حكومة إقليم كوردستان ـ العراق
وزارة التربية ـ المديرية العامة للمناهج والمطبوعات

العلـــوم للجميـــع

كتاب الطالب - الصف الثاني عشر العلمي

الطبعة السادسة
٢٠١٥م / ٢٧١٥ كوردي / ١٤٣٦ هـ

الأشراف الفني على الطبع
عثمان پيرداود كواز
آمانج اسماعيل عبدي

المحتَوَيات

الوَحدةُ الثانيةُ: التفاعلاتُ الكيميائيَّةُ 124

الفصل 5
طاقة التفاعلاتِ 126

الفصل 6
سرعة التفاعلاتِ 152

الفصل 7
الاتزانُ الكيميائيُّ 176

الفصل 8
تفاعلاتُ الأكسدةِ والاختزالِ 214

الفصل 9
الكيمياءُ الكهربائيَّةُ 234

الوحدة

1

المحاليلُ وسلوكُها

الفصول

1 المحاليل

2 الأيوناتُ في المحاليلِ المائيَّةِ والخصائصُ التجميعيَّةُ

3 الأحماضُ والقواعدُ

4 معايرةُ الحمضِ-القاعدةِ والرقمُ الهيدروجينيُّ

الشكُّ العلميُّ عندَ ابنِ الهيثمِ

الحقائقُ منغمسةٌ في الشبهاتِ، ولمْ يعصمِ اللهُ العلماءَ من الزللِ ولا حمى عِلْمَهم منَ التقصيرِ والخللِ. والواجبُ على الناظرِ في كتبِ العلومِ إذا كانَ غرضُه معرفةَ الحقائقِ أنْ يجعلَ نفسَهُ خصمًا لكلِّ ما ينظرُ فيهِ، ويحيلَ فكرَه في جميعِ حواشيهِ، ويخصمَه من جميعِ جهاتِه ونواصيهِ، ويتّهمَ نفسَه أيضًا عندَ خصامِهِ. فإذا سلكَ هذه الطريقَ انكشفَتْ له الحقائقُ.

(الحسنُ بنُ الهيثمِ، في مقالتِه: الشكوكُ على بطليموس)

الفصــــل 1

المحاليل

المحاليلُ مخاليطُ متجانسةٌ من مادّتَيْنِ أو أكثَرَ في طورٍ واحدٍ

القســـم 1-1

أنواعُ المخاليطِ

مؤشّراتُ الأداءِ

- يميّزُ بين المخاليطِ غيرِ المتجانسةِ والمخاليطِ المتجانسةِ.
- يصنّفُ المحاليلَ تبعًا لحالتَي المذابِ والمذيبِ.
- يقارنُ خصائصَ المعلّقاتِ والغرويّاتِ والمحاليلِ.
- يميّزُ بينَ الإلكتروليتاتِ واللاإلكتروليتاتِ.

من السهلِ أن تحدِّدَ أن بعضَ الموادِّ هي مخاليطُ، لأنكَ تستطيعُ أن ترى الأجزاءَ المكوِّنةَ لها. فمثلاً، تعتبرُ التربةُ خليطًا من موادَّ تتضمّنُ فتاتَ الصخورِ والموادَّ الحيوانيَّةَ والنباتيَّةَ المتحلِّلةَ. يمكنُكَ أنْ ترى ذلك عندما تلتقطُ كمّيَّةً من التربةِ وتضعُها في كفِّكَ وتنظرُ إليها عن كثَبٍ. في المقابلِ لا يبدو الحليبُ خليطًا، لكنَّه في الواقعِ خليطٌ. فالحليبُ يتكوَّنُ أساسًا من موادَّ دهنيَّةٍ، وبروتيناتٍ، وسكّرِ الحليبِ، والماءِ. إذا نظرْتَ إلى الحليبِ من خلالِ المجهرِ يبدو لك مشابهًا لما يظهرُ في الشكل 1-1أ حيث يمكنُكَ أن ترى قطراتِ الدهنِ المستديرةَ الصغيرةَ التي يرواحُ قطرُ كلٍّ منها بين 1 و 10 ميكرومتر μm. كذلك يمكنُكَ مشاهدةُ أشكالٍ غيرِ منتظمةٍ من جسيماتِ الكازيينِ (بروتين) التي يبلغُ قطرُ الواحدِ منها حوالي 0.2 μm. فالتربةُ والحليبُ كلاهما مثالانِ على المخاليطِ غيرِ المتجانسةِ، لأن تركيبَ كلٍّ منهما غيرُ متجانسٍ.

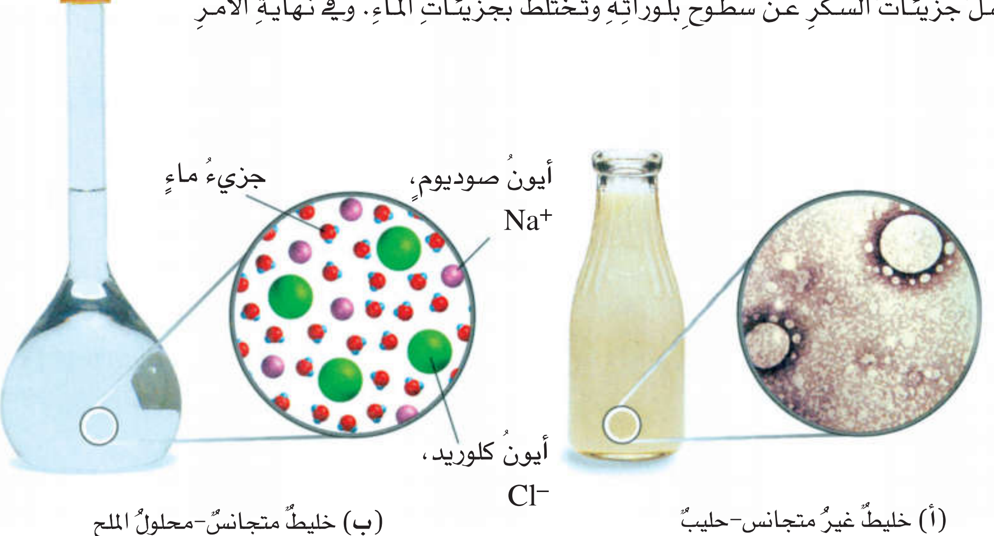
أما الملحُ (كلوريدُ الصوديومِ) والماءُ فيكوِّنانِ خليطًا متجانسًا، وذلك لأن أيوناتِ الكلوريدِ والصوديومِ موزَّعةٌ بشكلٍ متماثلٍ بين جزيئاتِ الماءِ. وهكذا يبدو هذا الخليطُ متجانسًا في كلِّ مكانٍ منهُ. الشكل 1-1ب يُظهرُ نموذجًا لخليطٍ متجانسٍ من الملحِ والماءِ.

المحاليل

لنفترضْ أنَّ مكعَّبًا من السكرِ أُسقطَ في كأسٍ تحتوي على الماءِ. وأنتَ تعرفُ من خلالِ الخبرةِ أن السكَّرَ سوف يذوبُ في الماءِ. ولهذا يوصفُ السكَّرُ بأنه قابلٌ للذوبانِ في الماءِ soluble.

ماذا يحصلُ عندما يذوبُ السكرُ؟ تبدأُ كتلةُ السكَّرِ في الاختفاءِ تدريجيًّا عندما تنفصلُ جزيئاتُ السكَّرِ عن سطوحِ بلوراتِهِ وتختلطُ بجزيئاتِ الماءِ. وفي نهايةِ الأمرِ

الشكل 1-1 (أ) يتألّفُ الحليبُ من جسيماتٍ مرئيَّةٍ في ترتيبٍ غيرِ منتظمٍ. (ب) الملحُ في الماءِ هو مثالٌ على الخليطِ المتجانسِ حيث تكون الأيوناتُ وجزيئاتُ الماءِ في ترتيبٍ عشوائيٍّ.



(ب) خليطٌ متجانسٌ-محلولُ الملحِ

(أ) خليطٌ غيرُ متجانسٍ-حليبٌ

تصبحُ جزيئاتُ السكَّرِ موزعةً بين جزيئاتِ الماءِ بشكلٍ متجانس. يدلُّ على ذلك المذاقُ الحلوُ المتساوي لكلِّ أجزاءِ الخليطِ، وزوالُ كلِّ الآثارِ المرئيَّةِ للسكَّرِ الصلبِ. مثلُ هذا الخليطِ يسمّى محلولاً. **فالمحلولُ solution** ***خليطٌ متجانسٌ من مادّتَيْن أو أكثرَ في طورٍ واحد***. في المحلولِ تكونُ الذرّاتُ أو الجزيئاتُ أو الأيوناتُ مخلوطةً بشكلٍ كامل. ينتجُ عن ذلك خليطٌ له التركيبُ نفسُهُ والخصائصُ نفسُها في كلِّ أجزائِه.

مكوِّناتُ المحاليلِ

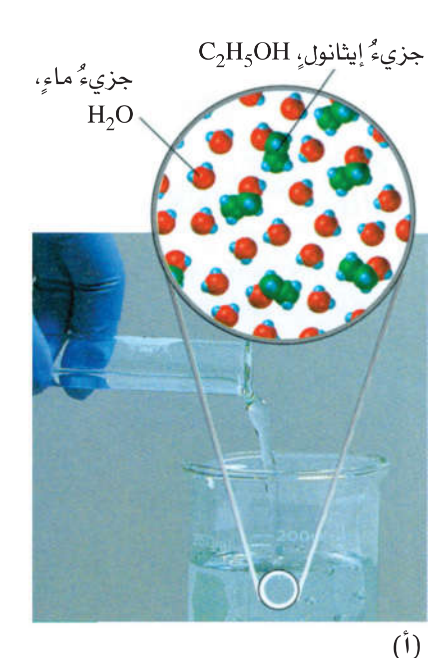
في أبسطِ أنواعِ المحاليلِ، كمحلولِ السكَّرِ مع الماءِ مثلاً، تختلطُ جسيماتُ إحدى المادَّتَيْن عشوائيًّا مع جسيماتِ المادةِ الأخرى. ***والوسطُ المذيبُ في أيِّ محلولٍ يسمّى المذيبَ*** **solvent**، ***بينما تسمّى المادةُ الذائبةُ فيه المذابَ*** **solute**. المذابُ بشكلٍ عامٍّ هو المكوِّنُ الموجودُ في المحلولِ بكمِّيَّةٍ أقلَّ. وفي محلولِ الإيثانولِ–الماءِ، الظاهرِ في الشكلِ 1-2، المذابُ هو الإيثانولُ بينما المذيبُ هو الماءُ. وهذه العباراتُ لا تكتسبُ أحيانًا أيَّ معنى. فمثلاً، في المحلولِ الذي يحتوي على 50% من الإيثانولِ و 50% من الماءِ يصعبُ أن نعيِّنَ أيُّ المكونينِ هو المذيبُ وأيُّهما المذابُ، وليسَ ضروريًّا ذلك.

في المحاليلِ تكونُ جسيماتُ المذابِ الذائبةُ في غايةِ الصغَرِ، بحيثُ لا يمكنُ رؤيتُها. وهذه الجسيماتُ تبقى في المحلولِ ما دامتِ الظروفُ القائمةُ لم تتغيَّرْ. وإذا سُكبَ المحلولُ الظاهرُ في الشكلِ 1-2 على ورقةِ ترشيحٍ فإن كلا المكوِّنَيْن، المذيبِ والمذابِ، يمرّانِ عبرَ ورقةِ الترشيحِ. أما أبعادُ جسيماتِ المذابِ فهي أبعادُ الذرّاتِ والجزيئاتِ والأيوناتِ، ويراوحُ قطرُ الجسيمِ بين 0.01 nm و 1 nm.

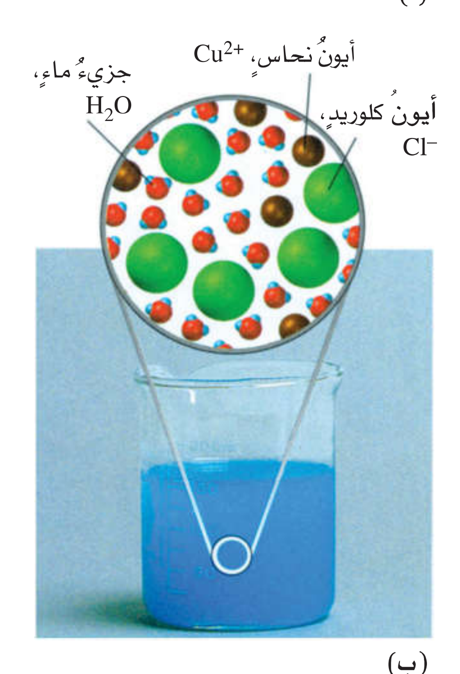
أنواعُ المحاليلِ

يمكنُ للمحاليلِ أن تكونَ في الحالةِ الغازيَّةِ أو السائلةِ أو الصلبةِ. الجدولُ 1-1 يُظهرُ بعضَ الاحتمالاتِ المكنةِ لكلٍّ من المذيبِ والمذابِ في الحالاتِ الثلاث: الغازيَّةِ والسائلةِ والصلبةِ. وفي كلٍّ من هذه الأمثلةِ يسمّى أحدُ المكوِّناتِ المذيبَ والآخرُ المذابَ.

كثيرٌ من السبائكِ، كالنحاسِ الأصفرِ (المصنوعِ من الخارصينِ والنحاسِ) والفضَّةِ الإسترلينيِّ (فضة 92%، نحاس 8%)، هي محاليلُ صلبةٌ تختلطُ فيها ذرّاتُ اثنينِ أو أكثرَ من الفلزّاتِ بشكلٍ متجانسٍ. الاختيارُ الملائمُ لنِسبِ الفلزّاتِ في السبائكِ يتيحُ الحصولَ على الخصائصِ المرغوبةِ. فمثلاً يمكنُ الحصولُ، من الفلزّاتِ النقيَّةِ، على



(أ)



(ب)

الشكل 1-2 يمكنُ أن يكونَ المذابُ في محلولٍ صلبًا أو سائلاً أو غازيًّا.
(أ) محلولُ الإيثانولِ–الماءِ مكوَّنٌ من مذابٍ سائل في مذيبٍ سائل.
(ب) محلولُ كلوريدِ النحاسِ (II)–الماءِ مكوَّنٌ من مذابٍ صلبٍ في مذيبٍ سائل. ومن الجديرِ بالملاحظةِ أن تركيبَ كلِّ محلولٍ يكونُ متجانسًا.

الجدول 1-1 بعضُ الاحتمالاتِ المكنةِ للمذابِ والمذيبِ في المحاليلِ

حالةُ المذابِ	حالةُ المذيبِ	مثال
غاز	غاز	أكسجينٌ في النيتروجينِ
غاز	سائل	ثنائي أكسيدِ الكربونِ في الماءِ
سائل	سائل	كحولٌ في الماءِ
سائل	صلب	الزئبقُ في الفضةِ والقصديرِ (ملغمُ حشوةِ الأسنانِ)
صلب	سائل	سكَّرٌ في الماءِ
صلب	صلب	النحاسُ في النيكلِ (سبيكةُ مونِل)

الشكل 3-1 (أ) الذهبُ من عيارِ 24 قيراطًا (24K) هو ذهبٌ نقيٌّ. (ب) الذهبُ من عيارِ 14 قيراطًا (14K) هو سبيكةٌ ذهبيَّةٌ تحتوي على الفضَّةِ. الذهبُ من عيارِ 14 قيراطًا هو ذهبٌ 14/24، أو هو ذهبُ 58.3%.

سبائكَ ذاتِ متانةٍ أكبرَ وذاتَ مقاومةٍ أكبرَ للتآكل. فالذهبُ النقيُّ من عيارِ 24 قيراطًا (24 K)، على سبيلِ المثالِ، هو فلزٌّ عالي الليونةِ يصعبُ استعمالُه في صناعةِ الحليِّ. فإذا سُكِبَ مع الفضَّةِ زادَتْ قوتُهُ وصلابتُه، واحتفظَ بمظهرِهِ وبمقاومتِهِ للتآكل. في الشكل 3-1 مقارنةٌ بين الذهبِ النقيِّ والسبيكةِ الذهبيَّة. والذهبُ (14 K) هو محلولٌ، لأنه خليطٌ منتظمٌ من الذهبِ والفضَّةِ على المستوى الذرّيِّ.

المعلَّقاتُ

إذا كانت الجسيماتُ في المذيبِ كبيرةَ الحجمِ بحيثُ تترسَّبُ وتستقرُّ إذا تُركَتْ دون تحريكٍ لفترةٍ مناسبةٍ، فإن الخليطَ يسمَّى معلَّقًا suspension. فكِّرْ في كأسٍ تحتوي على ماءٍ موحلٍ. فإذا تُركَتْ مستقرَّةً بعيدًا عن أيِّ تحريكٍ فإن جسيماتِ التربةِ تتجمَّعُ في قعرِ الكأسِ. هذه الجسيماتُ لها كثافةٌ أعلى من كثافةِ الماءِ، مما يجعلُها تترسَّبُ بفعلِ الجاذبيَّةِ. والجسيماتُ التي يزيدُ قطرُها عن 1000 nm، أي التي هي أكبرُ ألفَ مرةٍ من الذرّاتِ أو الجزيئاتِ أو الأيوناتِ، تشكِّلُ معلَّقاتٍ. ويمكنُ فصلُ جسيماتِ المعلَّقاتِ، بتمريرِ الخليطِ عبرَ ورقةِ ترشيحٍ.

الغرويّاتُ

المخاليطُ التي تقعُ أبعادُ جسيماتِها بينَ تلك الموجودةِ في المحاليلِ وتلك الموجودةِ في المعلَّقاتِ تعرفُ باسمِ الغرويّاتِ colloids. فالجسيماتُ التي يبلغُ قطرُها بين 1 nm و 1000 nm يمكنُها أن تكونَ غرويّاتٍ. فبعد أن تترسَّبَ جسيماتُ التربةِ الكبيرةُ الحجمِ في أسفلِ الماءِ الموحلِ يبقى الماءُ عكرًا، وذلك لأن الجسيماتِ الغرويةَ تبقى منتشرةً في هذا الماءِ. فإذا مُرِّرَ الخليطُ العكرُ عبرَ ورقةِ ترشيحٍ تمرُّ الجسيماتُ الغرويةُ عبرَها ويبقى الخليطُ عكرًا. والحقيقةُ هي أن جسيماتِ الخليطِ الغرويِّ صغيرةُ الحجمِ إلى حدٍّ يسمحُ لها بأن تبقى معلَّقةً في كاملِ المذيبِ، وذلك بسببِ الحركةِ المستمرَّةِ للجزيئاتِ المحيطةِ بها. الجسيماتُ الغرويَّةُ تشكِّلُ الطورَ المشتَّتَ، بينما يشكِّلُ الماءُ الوسطَ المشتِّتَ. والجدولُ 2-1 يقدِّمُ أمثلةً على مختلفِ أصنافِ الغرويّاتِ. يلاحَظُ هنا أن بعضَ العباراتِ الشائعةِ، كالمستحلَبِ والزَبَدِ (الرغوة)، ترجعُ في الحقيقةِ إلى أنواعٍ محدَّدةٍ من الغرويّاتِ. فالمايونيزُ، على سبيلِ المثالِ، مستحلَبٌ من قطراتِ الزيتِ في الماءِ يعملُ فيه صفارُ البيضِ كعاملٍ مستحلِبٍ لتحافظَ قطراتُ الزيتِ على تشتُّتِها.

الجدول 2-1 أصنافُ الغرويّاتِ

الأطوار	أمثلة
صلبٌ مشتَّتٌ في سائلٍ	الدهاناتُ، الطينُ
شبكةٌ صلبةٌ ممتدَّةٌ في السائلِ	الجيلاتينُ
سائلٌ مشتَّتٌ في سائلٍ	الحليبُ، المايونيزُ
غازٌ مشتّتٌ في سائلٍ	معجونُ الحلاقةِ، القشدةُ المخفوقةُ
صلبٌ مشتّتٌ في غازٍ	الدخانُ، الجسيماتُ المحمولةُ في الهواءِ، سناجُ (سخامُ) عوادمِ السيّاراتِ
سائلٌ مشتّتٌ في غازٍ	الضبابُ، الغمامُ، الغيومُ، الرذاذُ
سائلٌ مشتّتٌ في صلبٍ	الجبنةُ، الزبدةُ

الشكل 4-1 حزمةٌ من الضوءِ تمكِّنُ من التمييزِ بينَ الغرويِّ والمحلولِ. جسيماتُ الغرويِّ تشتِّتُ الضوءَ، وذلك يجعلُ الحزمةَ مرئيَّةً. خليطُ الجيلاتينِ مع الماءِ في الوعاءِ الأيمنِ هو غرويٌّ، أما الخليطُ المكوَّنُ من الماءِ وكلوريدِ الصوديومِ في الوعاءِ الأيسرِ فهو محلولٌ حقيقيٌّ.

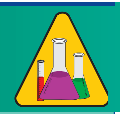
ظاهرةُ تيندال

يبدو الكثيرُ من الغرويّاتِ متجانسًا في الظاهرِ، لأن الجسيماتِ المنفردةَ فيها لا يمكنُ رؤيتُها. وهي مع ذلك تتمتَّعُ بحجمٍ كافٍ يسمحُ لها بتشتيتِ الضوءِ. لعلَّك لاحظْتَ أن حزمةَ الضوءِ المنبعثةَ من مصباحٍ تصبحُ مرئيَّةً من الجوانبِ في ظلامِ ليلٍ كثيرِ الضبابِ. فهذه الظاهرةُ المعروفةُ باسمِ **ظاهرةِ تيندال Tyndall effect**، ***تحدثُ عندما يتشتَّتُ الضوءُ بواسطةِ الجسيماتِ الغرويَّةِ المشتّتةِ في وسَطٍ شفّافٍ***. وظاهرةُ تيندال خاصَّةٌ يمكنُ استخدامُها للتمييزِ بين المحلولِ والغرويِّ، كما يبيِّنُ الشكلُ 4-1.

يوضحُ الجدولُ 3-1 الخصائصَ المميِّزةَ لكلٍّ من المحاليلِ والغرويّاتِ والمعلَّقاتِ. يمكنُ كشفُ الجسيماتِ منفردةً في الغرويِّ بواسطةِ مجهرٍ، وذلك باستعمالِ ضوءٍ ساطعٍ يسقطُ بزاويةٍ قائمةٍ على العيِّنةِ. هذه الجسيماتُ التي تبدو كبقعٍ صغيرةٍ من الضوءِ، تتمُّ رؤيتُها وهي تتحرَّكُ بسرعةٍ حركةً عشوائيَّةً تنتجُ عن تصادمِ الجزيئاتِ السريعةِ فيما بينها، وتسمّى حركتُها «الحركةَ البراونيَّةَ».

الجدول 3-1 خصائصُ المحاليلِ والغروياتِ والمعلقاتِ

محاليل	غرويات	معلّقات
متجانسة	غيرُ متجانسةٍ	غيرُ متجانسةٍ
قطرُ الجسيمِ من 0.01 nm إلى 1 nm، يمكن أن يكونَ ذرّةً أو جزيئًا أو أيونًا	قطرُ الجسيمِ من 1 nm إلى 1000 nm، مشتَّتةٌ، يمكنُ أن تكونَ تجمُّعاتٍ أو جزيئاتٍ كبيرةً	قطرُ الجسيمِ أكبرُ من 1000 nm، معلَّقةٌ، يمكنُ أن تكونَ تجمُّعاتٍ أو جسيماتٍ كبيرةً
لا تنفصلُ بالترويقِ	لا تنفصلُ بالترويقِ	الجسيماتُ تترسَّبُ
لا يمكنُ فصلُها بالترشيحِ	لا يمكنُ فصلُها بالترشيحِ	يمكنُ فصلُها بالترشيحِ
لا تشتِّتُ الضوءَ	تشتِّتُ الضوءَ (ظاهرةُ تيندال)	يمكنُ أن تشتِّتَ الضوءَ لكنَّها ليسَتْ شفّافةً



نشاط عملي سريع

ملاحظةُ المحاليل والمعلَّقاتِ والغرويّاتِ

ضعِ النظارةَ الواقيةَ والبسِ القفازاتِ والمريولَ

المواد

- ميزانٌ
- 7 كؤوسٍ زجاجيَّةٍ سعة 400 mL
- طينٌ
- زيتُ طبخٍ
- مصباحٌ كهربائيٌّ
- جلاتينٌ صافٍ
- سخانٌ كهربائيٌّ (لغلي الماءِ)
- ملوِّنُ طعامٍ أحمرُ
- بوراتُ الصوديوم $Na_2B_4O_7{\bullet}10H_2O$
- نشا قابلٌ للذوبانِ
- ساقٌ للتحريكِ
- سكَّرٌ
- حاملُ أنابيبِ اختبارٍ
- ماءٌ

الطريقة

1. حضِّرْ سبعةَ مخاليطَ يحتوي كلٌّ منها على 250 mL من الماءِ، وعلى واحدةٍ من الموادِّ التالية:
   - أ. 12 g من السكرِ
   - ب. 3 g من النشا القابلِ للذوبانِ
   - ج. 5 g من الطينِ
   - د. 2 mL من ملوِّناتِ الطعامِ
   - هـ. 2 g من بوراتِ الصوديومِ
   - و. 50 mL من زيتِ الطبخِ
   - ز. 3 g من الجلاتينِ

   تحضيرُ خليطِ الجلاتين: ليِّنِ الجلاتينَ في 65 mL من الماءِ البارِدِ، ثم أضفْ 185 mL من الماءِ المغليِّ.
2. لاحظِ المخاليطَ السبعةَ وميزاتِها. سجِّلْ مظهرَ كلِّ خليطٍ بعدَ التحريكِ.
3. انقلْ إلى أنابيبِ اختبارٍ منفردةٍ 10 mL من كلِّ خليطٍ لم ينفصلْ بعدَ التحريكِ. وجِّهْ شعاعَ مصباحٍ كهربائيٍّ إلى كلِّ خليطٍ في غرفةٍ مظلمةٍ. ضعْ إشارةً على المخاليطِ التي تجعلُ مسارَ حزمةِ الضوءِ مرئيًّا.

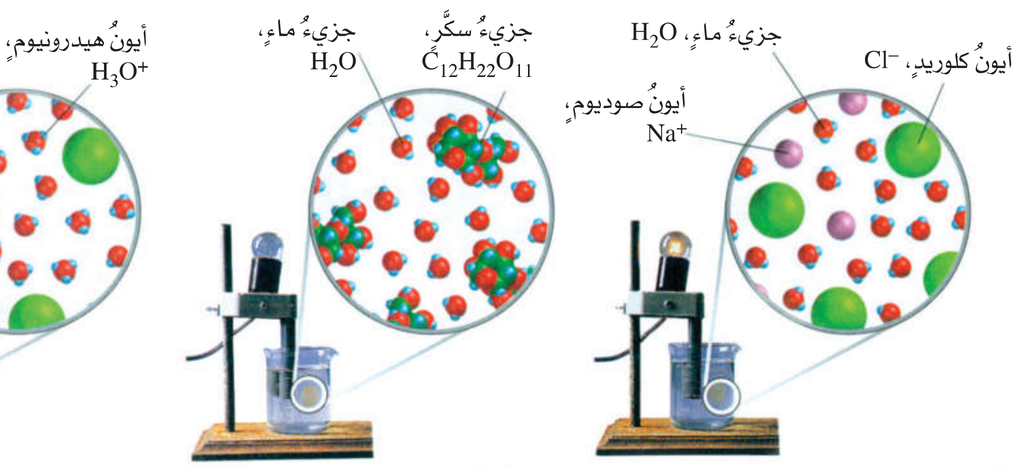
المناقشة

1. استخدمْ ملاحظاتِكَ لتصنيفِ المخاليطِ إلى محاليلَ أو معلَّقاتٍ أو غرويّاتٍ.
2. ما الخصائصُ التي استخدمتَها لتصنيفِ هذه المخاليطِ؟

الإلكتروليتاتُ واللاإلكتروليتاتُ

تصنَّفُ الموادُّ التي تذوبُ في الماءِ بحسبِ إنتاجِها لجزيئاتٍ أو أيوناتٍ في المحلول. عندما يذوبُ مركَّبٌ أيونيٌّ تنفصلُ الأيوناتُ السالبةُ والموجبةُ بعضُها عن بعضٍ، ويحاطُ كلٌّ منها بجزيئاتِ الماءِ. وتتحرَّكُ أيوناتُ المذابِ هذه بحرّيَّةٍ، ممّا يجعلُ المحلولَ قادرًا على توصيلِ التيارِ الكهربائيِّ. ***فالمادَّةُ التي تذوبُ في الماءِ لتنتجَ محلولاً موصِّلاً للتيّارِ الكهربائيِّ تسمّى الإلكتروليتَ electrolyte***. وبذلك يكونُ كلوريدُ الصوديومِ NaCl، إلكتروليتًا. وهي حالُ كلِّ مركَّبٍ أيونيٍّ قابلٍ للذوبانِ. وبعضُ المركَّباتِ الجزيئيَّةِ العاليةِ القطبيَّةِ، مثل كلوريدِ الهيدروجينِ HCl، هي أيضًا إلكتروليتاتٌ، لأن جزيئاتِ HCl تكوِّنُ الأيوناتِ H_3O^+ و Cl^- عندما تذابُ في الماءِ.

في المقابلِ، يكونُ المحلولُ الذي يحتوي على جزيئاتِ مذابٍ متعادلٍ غيرَ موصِّلٍ للتيارِ الكهربائيِّ، لأنه لا يحتوي على جسيماتٍ مشحونةٍ متحرِّكةٍ. إذن، ***فالمادَّةُ التي تذوبُ في الماءِ لتنتجَ محلولاً لا يوصِّلُ التيّارَ الكهربائيَّ تسمّى اللاإلكتروليتَ nonelectrolyte***.



(أ) محلولُ الملحِ مذابٌ إلكتروليتيٌّ

(ب) محلولُ السكَّرِ مذابٌ لاإلكتروليتيٌّ

(ج) محلولُ حمضِ الهيدروكلوريكِ مذابٌ إلكتروليتيٌّ

الشكل 5-1 (أ) كلوريدُ الصوديومِ يذوبُ في الماءِ لينتجَ محلولَ ملحٍ يوصِّلُ التيارَ الكهربائيَّ. هذا يعني أن NaCl هو إلكتروليتٌ. (ب) السكَّرُ يذوبُ في الماءِ لينتجَ محلولَ سكَّرٍ لا يوصِّلُ الكهرباءَ، فالسكَّرُ هو إذن لاإلكتروليت. (ج) كلويدُ الهيدروجين HCl يذوبُ في الماءِ لينتجَ محلولاً يوصِّلُ التيارَ الكهربائيَّ، فهو إذن إلكتروليتٌ.

فالسكَّرُ هو لاإلكتروليتٌ. يظهرُ الشكلُ 5-1 جهازًا لاختبارِ موصليَّةِ المحاليلِ. الأقطابُ هي موصِّلاتٌ متَّصلةٌ بمصدرِ تيّارٍ كهربائيٍّ، وهي على تماسٍّ مع محلولِ الاختبارِ. ولكي يمرَّ التيارُ في سلكِ المصباحِ الكهربائيِّ يجبُ أن يؤمِّنَ المحلولُ مسارًا موصِّلاً بين القطبينِ المغمورينِ فيه. فإذا لم يكنِ المحلولُ موصِّلاً بين القطبينِ تصبحُ الدارةُ مفتوحةً ولا يمرُّ التيّارُ.

وبالعكسِ، إذا كانَ المحلولُ المرادُ اختبارُهُ موصِّلاً، يتوهَّجُ المصباحُ الكهربائيُّ بضوءٍ ساطعٍ. هذا النوعُ من المحاليلِ يحتوي على موادَّ ذائبةٍ هي في الواقعِ إلكتروليتاتٌ. أما إذا كانَ المحلولُ موصِّلاً ضعيفًا فإن الضوءَ المنبعثَ من المصباحِ يكونُ خافتًا نسبيًّا. وإذا كانَ المحلولُ موصِّلاً رديئًا فإن المصباحَ لا يتوهَّجُ. إن محاليلَ كهذه تحتوي على موادَّ مذابةٍ تتَّصفُ بكونِها لاإلكتروليتاتٍ.

مراجعةُ القسمِ 1-1

1. صنِّفْ ما يلي إلى خليطٍ متجانسٍ وخليطٍ غيرِ متجانسٍ موضِّحًا إجابتَك.
أ. عصيرُ برتقالٍ ب. ماءُ الصنبورِ

2. أ. ماذا تُسمّى الموادُّ التي توصِّلُ محاليلُها المائيَّةُ التيّارَ الكهربائيَّ؟ ب. لماذا يوصِّلُ محلولُ الملحِ الكهرباءَ؟ ج. لماذا لا يوصِّلُ محلولُ السكَّرِ الكهرباءَ؟

3. ارسمْ شكلاً يُظهرُ الجسيماتِ في محلولِ NaCl، وبيِّنْ لماذا يوصِّلُ هذا المحلولُ الكهرباءَ. ارسمْ شكلاً يُظهرُ الجسيماتِ الموجودةَ في بلوراتِ NaCl لتبيِّنَ لماذا لا يوصِّلُ الملحُ النقيُّ التيّارَ الكهربائيَّ.

4. صفْ طريقةً تبيِّنُ بها أن خليطَ السكَّرِ والماءِ هو محلولٌ، وأن خليطَ الرملِ والماءِ ليسَ محلولاً.

5. سمِّ المذابَ والمذيبَ في الأنواعِ التاليةِ:
أ. ذهبٌ 14 قيراطًا.
ب. شرابُ الذرةِ.
ج. مياهٌ غازيَّةٌ.

تفكيرٌ ناقد

6. تحليلُ معلوماتٍ: تشكِّلُ المحاليلُ جزءًا مهمًّا في حياتِكَ اليوميَّةِ. اذكرْ ثلاثةَ محاليلَ تحتوي على O_2 و H_2O، وحدِّدْ دورَ كلٍّ منها (مذاب-مذيب).

عمليَّةُ الإذابةِ

القســـم 1-2

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يوضحُ أثرَ ثلاثةِ عواملَ تؤثِّرُ في سرعةِ ذوبانِ مذابٍ صلبٍ في مذيبٍ سائلٍ.
- يفسِّرُ اتِّزانَ المحلولِ، ويميِّزُ بين المحاليلِ المشبعةِ وغيرِ المشبعةِ وفوقِ المشبعةِ.
- يفسِّرُ بدلالةِ الموادِّ القطبيَّةِ والموادِّ غيرِ القطبيَّةِ معنى التعبيرِ «الشبيهُ يذيبُ الشبيهَ».
- يذكرُ العواملَ الثلاثةَ التي تشاركُ في حرارةِ المحلولِ، ويفسِّرُ كيف تتَّحدُ هذه العواملُ لتجعلَ عمليَّةَ الإذابةِ طاردةً للحرارةِ أو ماصَّةً للحرارةِ.
- يقارنُ تأثيراتِ الحرارةِ والضغطِ في الذوبانيَّةِ.

العواملُ التي تؤثِّرُ في سرعةِ الإذابةِ

ربما حاولْتَ مرةً أن تذيبَ السكَّرَ في الشاي المثلّجِ، فعرفْتَ أن درجةَ الحرارةِ تؤثِّرُ بشكلٍ ما في سرعةِ إذابتِه. فما العواملُ الأخرى التي تؤثِّرُ في سرعةِ إذابةِ السكَّرِ في الشاي المثلّجِ؟

- زيادةُ مساحةِ سطحِ المذابِ

يذوبُ السكَّرُ عندما تنفصلُ جزيئاتُهُ عن سطحِ البلورةِ وتخلطُ بجزيئاتِ الماءِ. ويصحُّ ذلك على أيِّ مذابٍ صلبٍ في مذيبٍ سائلٍ، لأن جزيئاتِ المذابِ أو أيوناتِه تنجذبُ نحوَ جزيئاتِ المذيبِ.

ولأن عمليَّةَ الإذابةِ تحدثُ على سطحِ المذابِ، فمن الممكنِ تسريعُها بزيادةِ مساحةِ سطحِهِ. وسحقُ مكعَّباتِ السكَّرِ أو بلوراتِهِ الكبيرةِ يزيدُ من مساحةِ سطحِه. وبشكلٍ عامٍّ، كلما زادتْ تجزئةُ المادَّةِ زادتْ مساحةُ سطحِها في وحدةِ الكتلةِ، وبالتالي زادتْ سرعةُ الإذابةِ. والشكلُ 1-6 يُظهرُ مثالاً لمحاليلَ تحتوي على مذابٍ واحدٍ لكنها تختلفُ في مساحةِ سطحِهِ المعرَّضِ للمذيبِ.

- تحريكُ المحلولِ

عندَ بدءِ عمليَّةِ الإذابةِ يكونُ تركيزُ المذابِ عاليًا بالقربِ من سطحِ المذابِ. فالتحريكُ أو الرجُّ يساعدُ على انتشارِ جزيئاتِ المذابِ ويجعلُ جزيئاتٍ جديدةً من المذيبِ على تماسٍّ

بلوراتٌ كبيرةٌ من $CuSO_4•5H_2O$

مسحوقُ $CuSO_4•5H_2O$ يزيدُ من مساحةِ السطحِ

الشكل 1-6 يمكنُ زيادةُ معدَّلِ سرعةِ إذابةِ المذابِ الصلبِ بزيادةِ مساحةِ سطحِهِ. فالمذابُ المسحوقُ له مساحةُ سطحٍ أكبرُ معرَّضةٌ لجزيئاتِ المذيبِ. ولذلك يذوبُ بسرعةٍ أكبرَ من مذابٍ ذي بلوراتٍ كبيرةِ الحجمِ.

مع سطحِ المذابِ. هكذا يبدو تأثيرُ التحريكِ مشابهًا لتأثيرِ سحقِ الصلبِ في زيادةِ سطحِ التماسِّ بين المذيبِ والمذابِ.

تسخينُ المذيبِ

لعلك لاحظتَ أن السكَّرَ، والكثيرَ من الموادِّ الأخرى، تذوبُ بسرعةٍ أكبرَ في الماءِ الساخنِ منها في الماءِ البارِدِ. فعندما ترتفعُ درجةُ حرارةِ المذيبِ تتحرَّكُ جزيئاتُهُ بسرعةٍ أكبرَ، ويزيدُ معدَّلُ طاقتِها الحركيَّةِ، لذلك يزدادُ معدَّلُ التصادمِ بين جزيئاتِ المذيبِ والمذابِ. هذا الأمرُ يساعدُ على فصلِ جزيئاتِ المذابِ بعضِها عن بعضٍ ويؤدي إلى تشتيتِها بين جزيئاتِ المذيبِ.

الذوبانيَّةُ (قابليَّةُ الذوبانِ)

إذا أضفتَ إلى كأسٍ من الشاي عدَّةَ ملاعقَ من السكَّرِ الواحدةَ تلْوَ الأخرى يتوقَّفُ السكَّرُ عن الذوبانِ عندَ حدٍّ معيَّنٍ. والواقعُ هو أنه لكلِّ عمليَّةِ مزجٍ بين مذيبٍ ومذابٍ صلبٍ، عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، حدودٌ لكمِّيَّةِ المذابِ التي يمكنُ إذابتُها. وفي أيِّ عمليَّةِ مزجِ مذيبٍ–مذابٍ، يصعبُ أن نتوقَّعَ هذه النقطةَ بدقَّةٍ، لأن الأمرَ يعتمدُ على طبيعةِ المذيبِ وطبيعةِ المذابِ وعلى درجةِ الحرارةِ.

فعندَما يضافُ السكرُ الصلبُ إلى الماءِ تنفصلُ، في بادئِ الأمرِ، جزيئاتُ السكَّرِ عن سطحِ الصلبِ وتتحرَّكُ عشوائيًّا في المذيبِ. بعضُ هذه الجزيئاتِ قد تصطدمُ بالبلَّوراتِ وتستقرُّ فيها (إعادةُ التبلورِ recrystallization). وبازديادِ كمِّيَّةِ الصلبِ الذائبِ يزدادُ تركيزُ جزيئاتِهِ في المذيبِ فيرتفعُ معدَّلُ اصطدامِها مع الصلبِ. في نهايةِ الأمرِ يصبحُ معدَّلُ سرعةِ عودةِ الجزيئاتِ إلى البلوراتِ مساويًا لمعدَّلِ سرعةِ انفصالِها عنها والتحامِها بالمذيبِ. وينشأُ اتزانٌ ديناميكيٌّ (حركيٌّ) بينَ الإذابةِ والترسيبِ. وتتمتَّعُ الموادُّ الأيونيَّةُ الصلبةُ بسلوكٍ مشابهٍ، كما يظهرُ في الشكلِ 1-7.

إن اتِّزانَ المحلولِ solution equilibrium ***هو الحالةُ الفيزيائيَّةُ التي يتساوى فيها معدَّلُ سرعةِ الإذابةِ مع معدَّلِ سرعةِ الترسيبِ.***

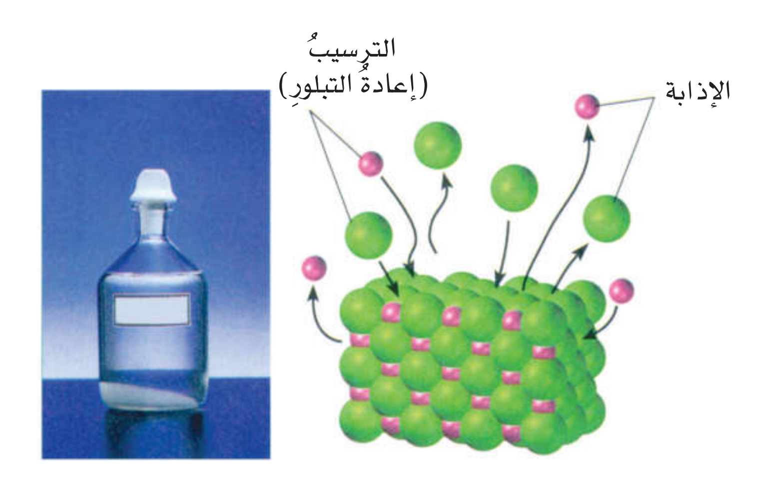
الكيمياءُ تطبيقًا

الكيميائيُّ البيئيُّ

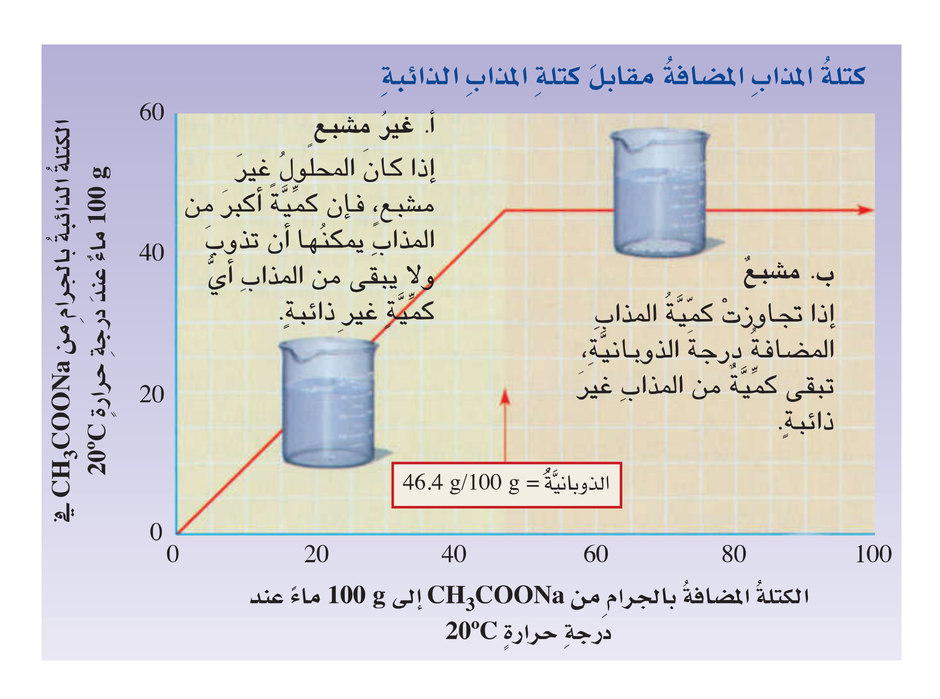
ماذا يحدثُ لجميعِ نفاياتِنا الكيميائيَّةِ، كموادِّ التنظيفِ المنزليَّةِ والشامبو، التي نرميها في مصارفِ المياهِ، ودخانِ المصانعِ والموادِّ التي لم تجرِ إزالتُها من مصانعِ معالجةِ المياهِ؟ يبحثُ الكيميائيّونَ البيئيّون في مصادرِ الموادِّ الكيميائيَّةِ وتأثيرِها في البيئةِ. ثم يستنبطون طرقًا مقبولةً للتخلُّصِ من الموادِّ الكيميائيَّةِ. وهذه الطرقُ هي:

- إجراءُ فحوصاتٍ تهدفُ إلى تحديدِ ما إذا كان الماءُ أو الهواءُ أو التربةُ قد تعرَّضَتْ للتلوُّثِ.
- تطويرُ برامجَ تساعدُ على إزالةِ التلوُّثِ.
- تصميمُ عمليّاتِ إنتاجٍ جديدةٍ للتخفيفِ من كمِّيّاتِ النفاياتِ المنتجةِ.
- التعاملُ مع القوانينِ، ومراعاةُ الظروفِ، وإرشاداتُ السلامةِ، وطرقُ الاستجابةِ لحالاتِ الطوارئِ.

لذلك، يتوجَّبُ على الكيميائيين البيئيين أن يفهموا ويستخدموا مجالاتٍ علميَّةً أخرى، منها علومُ الأحياءِ وعلومُ الأرضِ وعلومُ البيئةِ.



الشكل 1-7 في نظامٍ مغلقٍ يكونُ المحلولُ في حالةِ اتزانٍ، حيث يتمُّ ترسيبُ المذابِ بمعدَّلِ سرعةٍ مساوٍ لمعدَّلِ سرعةِ إذابتِهِ. ومع ذلك يبدو النظامُ عديمَ النشاطيَّةِ.



الشكل 1-8 يبيِّنُ الرسمُ البيانيُّ مدى كتلةِ المذابِ التي تنتجُ محلولاً غيرَ مشبعٍ. حالما يتمُّ تجاوزُ درجةِ الإشباعِ يكونُ النظامُ قد احتوى على مذابٍ صلبٍ غيرِ ذائبٍ.

المحاليلُ المشبعةُ والمحاليلُ غيرُ المشبعةِ

المحلولُ الذي يحتوي على الكمِّيَّةِ القصوى من المذابِ يوصفُ بأنه محلولٌ مشبعٌ **saturated solution**. كيف تستطيعُ أن تعرفَ أن محلولَ CH_3COONa الموضَّحَ في الشكل 1-8 هو محلولٌ مشبعٌ؟ إذا أضيفَتْ كمِّيَّةٌ أكبرُ من أسيتاتِ الصوديومِ إلى المحلولِ فإنها لا تذوبُ، بل ترسبُ في القاعِ، لأن اتِّزانًا قد نشأ بين الأيوناتِ المنفصلةِ عن الحالةِ الصلبةِ وتلك الداخلةِ إليها. أما إذا أُضيفتْ كمِّيَّةٌ أكبرُ من الماءِ إلى المحلولِ المشبعِ فإن كمِّيَّةً أكبرَ من أسيتاتِ الصوديومِ ستذوبُ فيه. عند درجةِ حرارةِ 20°C، تكونُ كتلةُ 46.4 g من CH_3COONa هي الكمِّيَّةُ القصوى التي تذوبُ في 100 g من الماءِ. ***المحلولُ الذي يحتوي على كمِّيَّةٍ من المذابِ أقلَّ من الكمِّيَّةِ الموجودةِ في المحلولِ المشبعِ تحتَ الظروفِ نفسِها هو محلولٌ غيرُ مشبعٍ*** **unsaturated solution**.

المحاليلُ فوقُ المشبعةِ

يُعرفُ المحلولُ فوقُ المشبعِ **supersaturated solution** ***بأنه محلولٌ يحتوي على كمِّيَّةٍ من المذابِ أكبرَ من الكمِّيَّةِ التي يحتوي عليها المحلولُ المشبعُ تحتَ الظروفِ نفسِها.*** والطريقةُ الأكثرُ شيوعًا لتحضيرِ المحاليلِ فوقِ المشبعةِ هي تبريدُ المحلولِ المشبعِ دونَ هزِّه. وفي حالةِ هزِّ المحلولِ المشبعِ أو إضافةِ بلورةٍ صلبةٍ من المذابِ إليه (زرعِ بذرةِ التبلورِ seeding)، تحدثُ عمليَّةُ تكوينٍ سريعٍ لبلوراتِ المذابِ الفائضةِ.

قيمُ الذوبانيَّةِ

ذوبانيَّةُ **solubility** ***مادَّةٍ معيَّنةٍ هي الكمِّيَّةُ الضروريَّةُ من هذه المادةِ لتكوينِ محلولٍ مشبعٍ في كمِّيَّةٍ محدَّدةٍ من المذيبِ عندَ درجةِ حرارةٍ محدَّدةٍ.*** ذوبانيَّةُ السكَّرِ، على سبيلِ المثالِ، هي 204 g من السكَّرِ في 100 g من الماءِ عندَ درجةِ حرارةِ 20°C. يجبُ تحديدُ درجةِ الحرارةِ لأن الذوبانيَّةَ تتغيَّرُ بتغيُّرِها. أما فيما يتعلَّقُ بالغازاتِ فيجبُ تحديدُ

الضغطِ أيضًا. ويتمُّ تحديدُ الذوبانيَّةِ من خلالِ التجربةِ، وهي تتغيَّرُ بشكلٍ واسعٍ، كما يظهرُ في الجدولِ 1-4. وتقدِّمُ كتبُ الكيمياءِ قيمَ الذوبانيَّةِ، معبَّرًا عنها بكتلةِ المذابِ بالجرامِ في 100 g من المذيبِ، أو في 100 mL منه، عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ.

الكمِّيَّةُ القصوى الذائبةُ من مذابٍ معيَّنٍ عند بلوغِ حالةِ الاتِّزانِ تبقى دائمًا هي نفسَها تحتَ الظروفِ نفسِها (بغضِّ النظرِ عن سرعةِ الإذابةِ).

التأثيراتُ المتبادلةُ بين المذابِ والمذيبِ

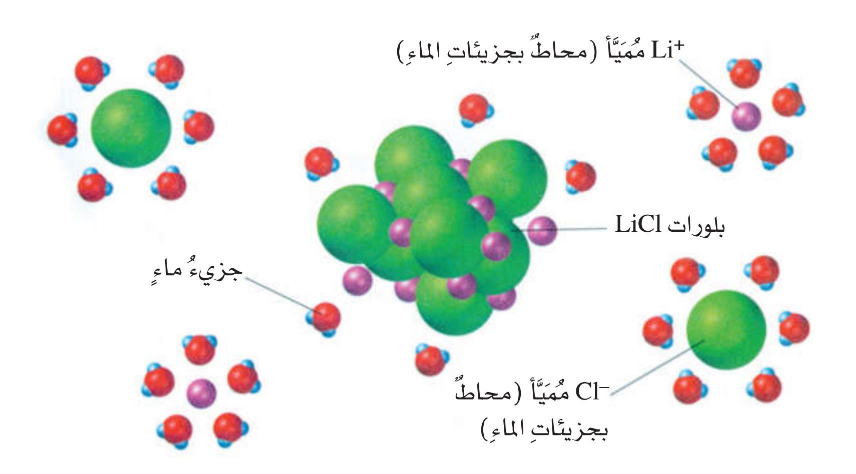
يتمتَّعُ كلوريدُ الليثيومِ بذوبانيَّةٍ عاليةٍ في الماءِ، أما الجازولينُ فليسَ كذلك. فالجازولينُ يختلطُ بسهولةٍ مع البنزينِ C_6H_6، في حينِ أن كلوريدَ الليثيومِ لا يتمتَّعُ بهذه الخاصَّةِ. لماذا توجدُ هذه الفروقُ في الذوبانيَّةِ؟

إن القاعدةَ «الشبيهُ يذيبُ الشبيهَ» تعتبرُ قاعدةً تقريبيَّةً، ولكنها مفيدةٌ لتوقُّعِ ذوبانِ مادَّةٍ في مادَّةٍ أخرى. يعتمدُ التشابهُ بين الموادِّ على نوعِ الترابطِ، وعلى قطبيَّةِ الجزيئاتِ، وعلى القوى البينيَّةِ، التي بين المذابِ والمذيبِ.

الجدول 1-4 ذوبانيَّةُ بعضِ الموادِّ تبعًا لدرجةِ الحرارةِ (g مذاب في 100. g ماء)

المادة	درجةُ الحرارةِ (°C) 0	20	40	60	80	100
$AgNO_3$	122	216	311	440	585	733
$Ba(OH)_2$	1.67	3.89	8.22	20.94	101.4	–
$C_{12}H_{22}O_{11}$	179	204	238	287	362	487
$Ca(OH)_2$	0.189	0.173	0.141	0.121	–	0.07
$Ce_2(SO_4)_3$	20.8	10.1	–	3.87	–	–
KCl	28.0	34.2	40.1	45.8	51.3	56.3
KI	128	144	162	176	192	206
KNO_3	13.9	31.6	61.3	106	167	245
LiCl	69.2	83.5	89.8	98.4	112	128
Li_2CO_3	1.54	1.33	1.17	1.01	0.85	0.72
NaCl	35.7	35.9	36.4	37.1	38.0	39.2
$NaNO_3$	73	87.6	102	122	148	180
CO_2 (غاز عند SP)	0.335	0.169	0.0973	0.058	–	–
O_2 (غاز عند SP)	0.00694	0.00537	0.00308	0.00227	0.00138	0.00

الضغطُ القياسيُّ = SP



الشكل 1-9 عندما يذوبُ LiCl تتميَّأُ أيوناته. فالتجاذبُ الحاصلُ بين الأيوناتِ وجزيئاتِ الماءِ هو من القوةِ بحيثُ يصبحُ كلُّ أيونٍ في المحلولِ محاطًا بجزيئاتِ الماءِ.

إذابةُ المركَّباتِ الأيونيَّةِ في المحاليلِ المائيَّةِ

تلعبُ قطبيَّةُ جزيئاتِ الماءِ دورًا مهمًّا في تكوينِ محاليلِ المركَّباتِ الأيونيَّةِ في الماءِ. فالأطرافُ المشحونةُ جزئيًّا من جزيئاتِ الماءِ تجذبُ أيوناتِ المركَّبِ الأيونيِّ التي تصبحُ محاطةً بجزيئاتِ الماءِ، فتنفصلُ عن الأيوناتِ الأخرى في المحلولِ. لنفترضْ أننا أسقطْنا بضعَ بلوراتٍ من كلوريدِ الليثيوم في وعاءٍ يحتوي على الماءِ، فعلى سطحِ البلورةِ تصبحُ جزيئاتُ الماءِ على تماسٍّ مع الأيونات Li^+ و Cl^-. عندها تنجذبُ أطرافُ جزيئاتِ الماءِ السالبةُ إلى أيوناتِ Li^+، بينما تنجذبُ أطرافُ جزيئاتِ الماءِ الموجبةُ إلى أيوناتِ Cl^-. قوةُ الجذبِ هذه ما بين جزيئاتِ الماءِ والأيوناتِ كافيةٌ لسحبِ الأيوناتِ من سطحِ البلَّوراتِ إلى المحلولِ، كما يظهرُ في الشكل 1-9. ***عمليَّةُ الإذابةِ هذه في الماءِ، بصفتِه المذيبَ، تُسمَّى التَّميُّؤَ hydration***. والأيوناتُ يقالُ إنها مُميّأة (محاطةٌ بجزيئاتِ الماءِ). عندما تنتشرُ الأيوناتُ الميَّأةُ في المحلولِ تتعرَّضُ أيوناتٌ غيرُها على سطحِ البلَّوراتِ لجزيئاتِ المذيبِ، فيجري سحبُها هي الأخرى وفصلُها عن البلوراتِ. وتدريجيًّا تذوبُ البلورةُ بكاملِها، وتتوزَّعُ الأيوناتُ المَيّأةُ في المحلولِ بشكلٍ متجانسٍ.

المذيباتُ غيرُ القطبيَّةِ

بشكلٍ عامٍّ، لا تذوبُ المركَّباتُ الأيونيَّةُ، ككلوريد الليثيوم مثلاً، في المذيبات غير القطبية، كرباعي كلوريدِ الكربونِ CCl_4 والتولوين $C_6H_5CH_3$. فجزيئاتُ المذيبِ غيرِ القطبيِّ لا تجذبُ أيوناتِ البلورةِ بقوَّةٍ تكفي للتغلُّبِ على القوى التي تسبِّبُ تماسكَ البلورةِ.

هل تتوقَّعُ أن يذوبَ كلوريدُ الليثيوم في التولوين؟ لا، إن LiCl لا يذوبُ في التولوين، لأن LiCl و $C_6H_5CH_3$ يختلفانِ كثيرًا في نوعِ الترابطِ وفي القطبيَّةِ وفي القوى البينيَّةِ.

المذاباتُ والمذيباتُ السائلةُ

عندما ترجُّ أنبوبةَ اختبارٍ تحتوي على ماءٍ وزيتٍ تنتشرُ قطراتٌ صغيرةٌ من الزيتِ في الماءِ. لكن حالما يتوقَّفُ رجُّ الأنبوبةِ تتجمَّعُ قطراتُ الزيتِ مع بعضِها لتكوِّنَ طبقةً منفصلةً، وذلك بفضلِ الرابطةِ الهيدروجينيَّةِ القويَّةِ التي تجذبُ جزيئاتِ الماءِ بعضَها

إلى بعض. ***السوائلُ التي لا تذوبُ في سوائلَ أخرى هي سوائلُ غيرُ قابلةٍ للامتزاج immiscible***. فالتولوينُ والماءُ، كما يظهرُ في الشكل 1-10، يشكّلانِ مثالاً آخرَ على الموادِّ غيرِ القابلةِ للامتزاجِ.

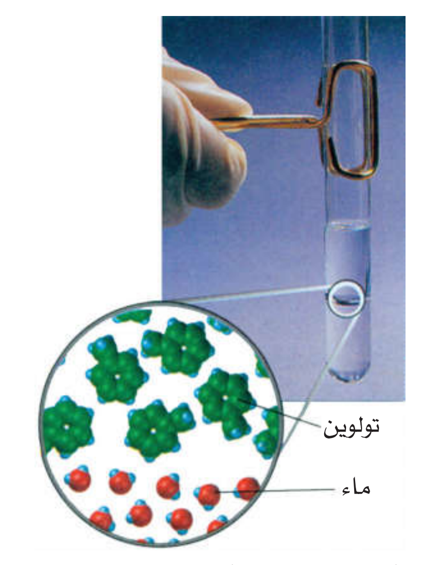
بشكلٍ عامٍّ تذوبُ الموادُّ غيرُ القطبيَّةِ، كالزيوتِ والدهونِ والشحومِ، في السوائلِ غيرِ القطبيَّةِ، كرابعِ كلوريدِ الكربونِ والتولوينِ والبنزينِ. إن قوةَ الجذبِ الوحيدةَ القائمةَ بين الجزيئاتِ غيرِ القطبيَّةِ هي قوى تشتُّتِ لندنَ، وهي في الواقعِ قوًى ضعيفةٌ. لذلك فإن قوى التجاذبِ بين الجزيئاتِ في المحلولِ تشبهُ إلى حدٍّ بعيدٍ القوى الموجودةَ بين جزيئاتِ الموادِّ النقيَّةِ. وهكذا تستطيعُ الجزيئاتُ أن تمتزجَ بسهولةٍ.

السوائلُ التي تذوبُ في سوائلَ أخرى بحرّيَّةٍ وبمختلفِ النسبِ هي سوائلُ قابلةٌ للامتزاج miscible. فالبنزينُ ورُباعي كلوريدِ الكربونِ مادتانِ قابلتانِ للامتزاجِ، وذلك لأن جزيئاتِهما غيرَ القطبيَّةِ لا يوجدُ بينَها قوى جذبٍ أو تنافرٍ كبيرةٌ، مما يؤدي إلى امتزاجِها بحرّيَّةٍ. بينَما تمتزجُ جزيئاتُ الماءِ والإيثانول بحرّيَّةٍ، كما يظهرُ في الشكل 1-11، وذلك لسببٍ مختلفٍ. فالواقعُ أن مجموعةَ OH– في جزيءِ الإيثانول تتميَّزُ ببعضِ القطبيَّةِ. هذه المجموعةُ تستطيعُ أن تكوِّنَ روابطَ هيدروجينيَّةً سواءٌ مع جزيئاتِ الإيثانولِ المماثلةِ، أو مع جزيئاتِ الماءِ. وبذلك تصبحُ القوى البينيَّةُ في الخليطِ مشابهةً جدًّا للقوى البينيَّةِ الموجودةِ في السوائلِ النقيَّةِ، مما يؤدي إلى ذوبانِ هذه السوائلِ بعضِها في بعضٍ تبادليًّا وبكلِّ النسبِ.

```
   H  H
H–C–C–OH     إيثانول
   H  H
```

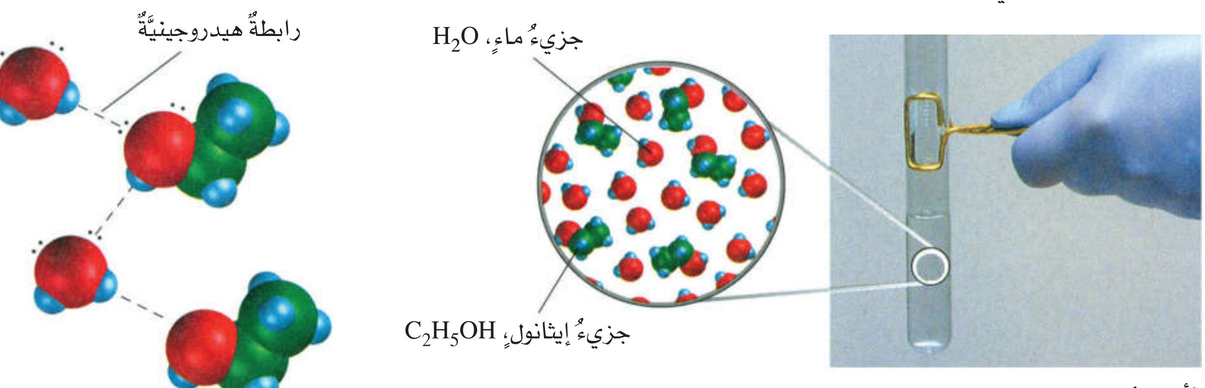
الجازولينُ محلولٌ يتكوَّنُ من هيدروكربوناتٍ غيرِ قطبيَّةٍ. وهو أيضًا مذيبٌ ممتازٌ للزيوتِ والدهونِ والشحومِ. تجدرُ الإشارةُ إلى أن غالبيَّةَ القوى البينيَّةِ الفاعلةِ بين الجزيئاتِ غيرِ القطبيَّةِ هي من نوعِ قوى تشتُّتِ لندنَ الضعيفةِ.

يتَّخذُ الإيثانولُ، من حيثُ قطبيَّتُهُ، موقعًا وسطًا بين الماءِ ورابعِ كلوريدِ الكربونِ. فهو لا يُعدُّ كالماءِ في إذابتِه للموادِّ القطبيَّةِ أو الأيونيَّةِ. فكلوريدُ الصوديوم قليلُ الذوبانِ في الإيثانولِ. في المقابلِ يعتبرُ الإيثانولُ مذيبًا أفضلَ من الماءِ للموادِّ الضعيفةِ القطبيَّةِ، لأن جزيءَ الإيثانولِ فيه شقٌّ غيرُ قطبيٍّ.



غيرُ قابلٍ للذوبانِ وغيرُ قابلٍ للامتزاجِ

الشكل 1-10 التولوينُ والماءُ غيرُ قابلَيْنِ للامتزاجِ. لذلك تكونُ مكوِّناتُ هذا النظامِ منفصلةً إلى طبقتَيْنِ.



(أ) قابلٌ للامتزاجِ

الشكل 1-11 (أ) الماءُ والإيثانولُ قابلانِ للامتزاجِ. مكوِّناتُ هذا النظامِ تكونُ في طورٍ واحدٍ وفي ترتيبٍ متجانسٍ. (ب) تزيدُ الرابطةُ الهيدروجينيَّةُ بين المذابِ والمذيبِ ذوبانيَّةَ الإيثانولِ في الماءِ.

تأثيرُ الضغطِ في الذوبانيَّةِ

لتغيُّراتِ الضغطِ تأثيرٌ ضعيفٌ في ذوبانيةِ الموادِّ الصلبةِ أو السوائلِ في المذيباتِ السائلةِ. غيرَ أن ازديادَ الضغطِ يسبِّبُ ازديادًا في ذوبانيَّةِ الغازاتِ في السوائلِ.

عندما يكونُ غازٌ ما على تماسٍّ مع سطحِ سائلٍ معيَّن، فإن جزيئاتِ الغازِ تدخلُ في هذا السائلِ. وعندما تزدادُ كمّيَّةُ الغازِ الذائبِ تبدأ بعضُ جزيئاتِ الغازِ في الانفلاتِ من السائلِ، وتدخلُ من جديدٍ في الطورِ الغازيِّ. في نهايةِ الأمرِ ينشأُ اتزانٌ بين معدَّلَيْ دخولِ جزيئاتِ الغازِ وخروجِها من الطورِ السائلِ. ومادامَ هذا الاتّزانُ قائمًا، ولم يتعرَّضْ لأيِّ اضطرابٍ، تبقى ذوبانيَّةُ الغازِ ثابتةً تحتَ ضغطٍ معيَّنٍ.

$$\text{غاز} + \text{مذيب} \rightleftharpoons \text{محلول}$$

إن ازديادَ ضغطِ المذابِ الغازيِّ على المحلولِ يعرِّضُ الاتزانَ للاضطرابِ، فيزدادُ معدَّلُ اصطدامِ الجزيئاتِ بسطحِ السائلِ. وازديادُ الضغطِ يزيدُ جزئيًّا من معدَّلِ دخولِ جزيئاتِ الغازِ في المحلولِ. في المقابلِ، يسبِّبُ ازديادُ كمّيَّةِ الغازِ الذائبِ ازديادًا في معدَّلِ انفلاتِ جزيئاتِ الغازِ من سطحِ السائلِ. في النهايةِ تنشأُ حالةُ اتزانٍ جديدةٌ، لكن عندَ قيمةٍ أعلى للذوبانيَّةِ. فإذن، يسبِّبُ ازديادُ ضغطِ الغازِ انزياحًا لحالةِ الاتزانِ مما يزيدُ من عددِ الجزيئاتِ الغازيَّةِ في الطورِ السائلِ.

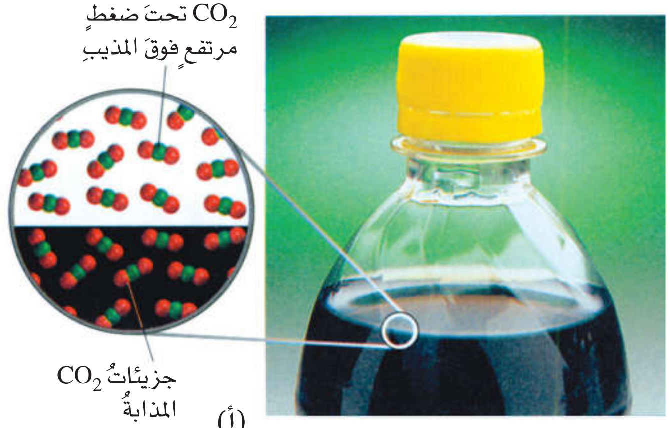
الشكل 1-12 (أ) في قنّينةِ مشروبٍ غازيٍّ مقفلةٍ لا يوجدُ فقاقيعُ غازٍ، لأن الضغطَ الذي يمارسُهُ الغازُ CO_2 عند التعبئةِ يحفظُ هذا الغازَ ذائبًا في السائلِ. (ب) عند نزعِ سدادةِ القنّينةِ ينخفضُ ضغطُ الغازِ CO_2 فوقَ السائلِ، لذلك يستطيعُ هذا الغازُ أن ينفلتَ من السائلِ. ويفورُ محلولُ المشروبِ عندما تفتحُ القنّينةُ وينخفضُ الضغطُ.

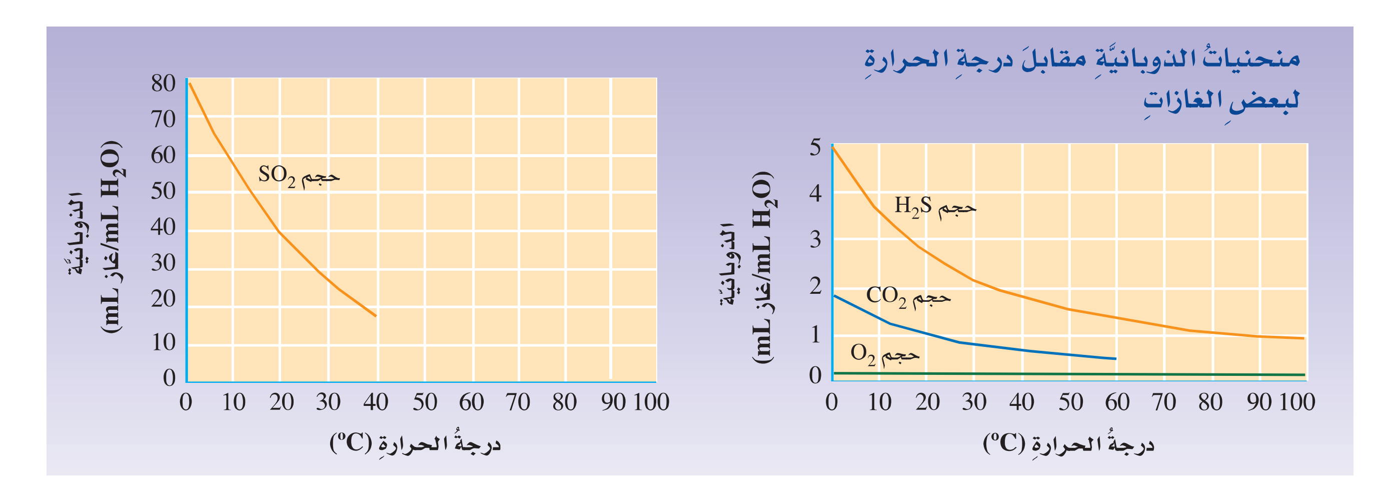
قانونُ هنري

ينصُّ **قانونُ هنري Henry's law** ***على أن ذوبانيَّةَ الغازِ في السائلِ تتناسبُ طرديًا مع الضغطِ الجزئيِّ الذي يمارسُهُ الغازُ على سطحِ السائلِ.*** يطبَّقُ قانونُ هنري على محاليلِ الغازاتِ في السوائلِ عند درجةِ حرارةٍ ثابتةٍ.

لنتذكَّرِ الآنَ أن كلَّ غازٍ في خليطٍ من الغازاتِ المثاليَّةِ يمارسُ، عند درجةِ حرارةٍ ثابتةٍ وحجمٍ ثابتٍ، ضغطًا يساوي الضغطَ الذي يمارسُهُ عندما يشغلُ الحجمَ نفسَهُ منفردًا. لنفترضْ أن الغازاتِ في الخليطِ لا تتفاعلُ فيما بينها، فعندئذٍ كلُّ غازٍ يذوبُ بالمقدارِ نفسِهِ الذي يذوبُ به منفردًا.

تزيدُ ذوبانيَّةُ CO_2 في المشروباتِ الغازيَّةِ عند ازديادِ الضغطِ مع ثباتِ الحجمِ. في معملِ التعبئةِ يجري إدخالُ غازِ ثنائي أكسيدِ الكربونِ CO_2 في محلولِ المشروبِ تحتَ ضغطٍ يراوحُ بين 5 atm و 10. ثم تجري تعبئةُ محلولِ الغازِ في السائلِ في قنانٍ أو علبٍ معدنيَّةٍ، ويتمُّ إقفالُها بإحكامٍ. عندما تنزعُ السدادةُ ينخفضُ مستوى الضغطِ إلى 1 atm فينطلقُ بعضٌ من غازِ ثنائي أكسيدِ الكربونِ مشكِّلاً فقاقيعَ غازيَّةً. ***الانفلاتُ السريعُ لغازٍ من مذيبٍ سائلٍ يعرفُ باسمِ*** **الفورانِ effervescence**، وهو مبيَّنٌ في الشكلِ 1-12.



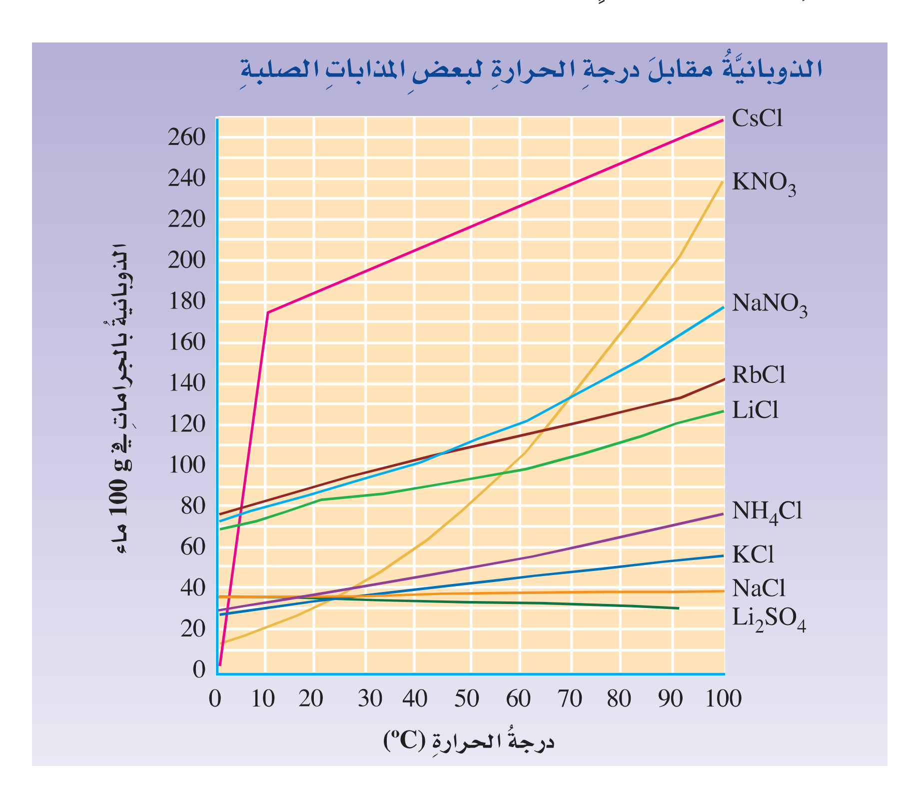


الشكل 13-1 تنخفضُ ذوبانيَّةُ الغازاتِ في الماءِ بارتفاعِ درجةِ الحرارةِ. أيُّ الغازين له ذوبانيَّةٌ أكبرُ عند درجةِ الحرارةِ 30°C، CO_2 أم SO_2؟

تأثيرُ درجةِ الحرارةِ في الذوبانيَّةِ

تأمَّلِ الشكلَ 13-1. ما تأثيرُ درجةِ الحرارةِ في الذوبانيَّةِ؟ تنخفضُ عادةً ذوبانيَّةُ الغازِ عندما ترتفعُ درجةُ الحرارةِ. والواقعُ هو أنه عندما ترتفعُ درجةُ الحرارةِ يزدادُ معدَّلُ الطاقةِ الحركيَّةِ للجزيئاتِ في المحلولِ. بذلك يرتفعُ عددُ جزيئاتِ المذابِ القادرةِ على الإفلاتِ من قوةِ جذبِ جزيئاتِ المذيبِ والعودةِ إلى الطورِ الغازيِّ. إذنْ عند درجةِ حرارةٍ أعلى يتمُّ بلوغُ الاتّزانِ بعددٍ أقلَّ من جزيئاتِ الغازِ في المحلولِ، وتصبحُ الغازاتُ، بشكلٍ عامٍّ، أقلَّ قابليَّةً للذوبانِ.

يصعبُ توقُّعُ تأثيرِ درجةِ الحرارةِ في الذوبانيَّةِ في حالةِ ذوبانِ الموادِّ الصلبةِ في السوائلِ. وتزدادُ غالبًا ذوبانيَّةُ الموادِّ الصلبةِ بارتفاعِ درجةِ الحرارةِ. ومع ذلك فإن الارتفاعَ نفسَهُ في درجةِ الحرارةِ يمكنُه أن يُنتِجَ ارتفاعًا كبيرًا في الذوبانيَّةِ في بعضِ المذيباتِ، وضئيلاً في مذيباتٍ أخرى.



الشكل 14-1 تبيِّنُ المنحنياتُ البيانيَّةُ لذوبانيَّةِ المذاباتِ الصلبةِ المختلفةِ، بشكلٍ عامٍّ، ارتفاعًا في الذوبانيَّةِ مع ارتفاعِ درجةِ الحرارةِ. تستطيعُ أن ترى في الرسمِ البيانيِّ أن ذوبانيَّةَ $NaNO_3$ تتأثَّرُ بالحرارةِ أكثرَ من ذوبانيَّةِ NaCl.

تأمَّل الجدولَ 1-4، الصفحةَ 18، والشكلَ 1-14 في الصفحةِ السابقةِ، وقارنْ تأثيرَ الحرارةِ في ذوبانيَّةِ نيتراتِ البوتاسيوم KNO_3، وكلوريدِ الصوديوم NaCl. ستجدُ أن حواليْ 14 g من نيتراتِ البوتاسيوم تذوبُ في 100 g ماء عند درجةِ حرارةِ 0.ºC. وتزدادُ ذوبانيَّةُ نيتراتِ البوتاسيوم بكمّيَّةٍ أكبرَ من 150 g من KNO_3 في 100 g من H_2O، عندما ترتفعُ درجةُ الحرارةِ إلى 80.ºC. وتحتَ الظروفِ نفسِها تزدادُ ذوبانيَّةُ كلوريدِ الصوديوم بكمّيَّةٍ تبلغُ حواليْ 2 g من NaCl في 100 g من الماءِ. وفي بعضِ الحالاتِ تنخفضُ ذوبانيةُ الصلبِ عندَ ارتفاعِ درجةِ الحرارة. فمثلاً، تنخفضُ ذوبانيَّةُ كبريتاتِ السيريوم $Ce_2(SO_4)_3$، بكمّيَّةِ 17 g/100 g عندَما تتغيَّرُ درجةُ الحرارةِ من 0.ºC إلى 60.ºC.

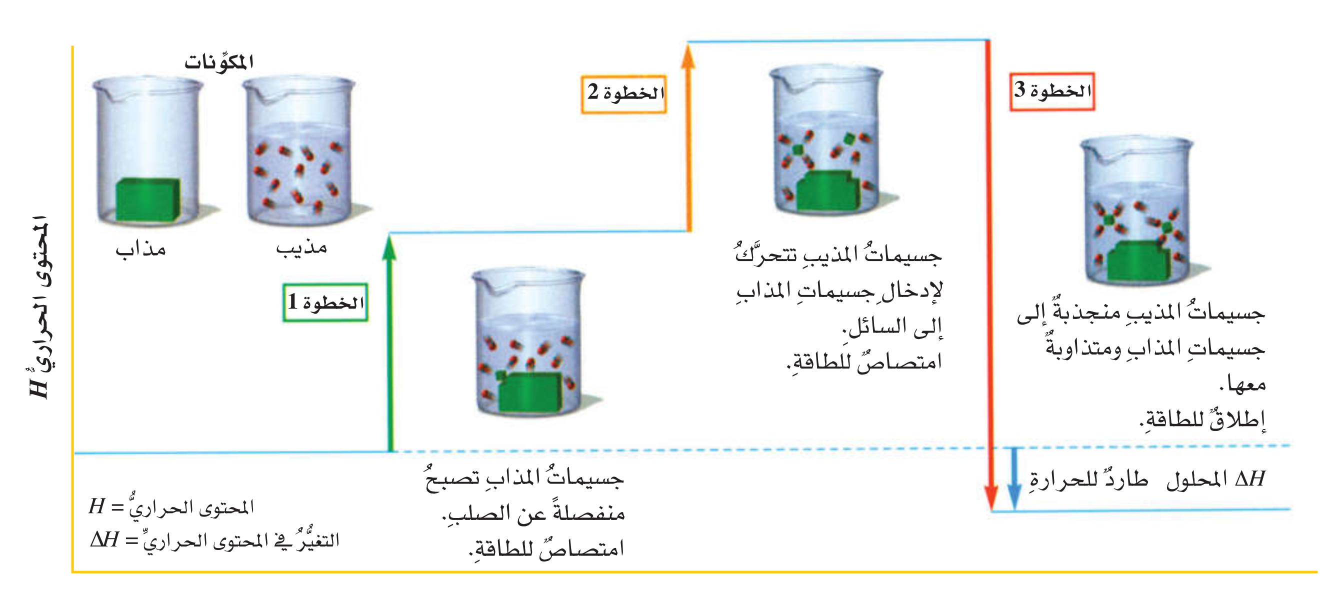
حرارةُ المحلولِ

يصحبُ تكوُّنَ محلولٍ ما تغيُّرٌ في الطاقةِ. فمثلاً، عندما تذيبُ بعضَ يوديدِ البوتاسيوم KI، في الماءِ تشعرُ بالبرودةِ لدى ملامستِكَ جوانبَ الوعاءِ الخارجيَّةَ. لكن عندَما تذيبُ كمّيَّةً من هيدروكسيدِ الصوديوم NaOH بالطريقةِ نفسِها، فإنك تشعرُ بالحرارةِ. إذن، من الواضح أن تكوُّنَ محلولٍ ناتجٍ عن إذابةِ صلبٍ في سائلٍ يمكنُهُ إما أن يمتصَّ الطاقةَ (KI في الماء)، أو أن يطلقَ الطاقةَ (NaOH في الماء).

خلالَ عمليَّةِ تكونِ المحلولِ تتعرَّضُ جسيماتُ المذيبِ والمذابِ لتغيُّراتٍ في القوى التي تجذبُها إلى جسيماتٍ أخرى. قبلَ بدءِ الإذابةِ تكونُ جزيئاتُ المذيبِ مترابطةً بواسطةِ قوى بينيَّةٍ (قوى جذبِ مذيبٍ–مذيبٍ). كذلك تكونُ جزيئاتُ المذابِ مترابطةً بواسطةِ قوى بينيَّةٍ (قوى جذبِ مذابٍ–مذابٍ). ويحتاجُ فصلُ جزيئاتِ المذابِ بعضِها عن بعض وجزيئاتِ المذيبِ عن مثيلاتِها إلى طاقةٍ. وعندَ ارتباطِ جزيئاتِ المذيبِ بجسيماتِ المذابِ تنتجُ طاقةٌ. ***وجسيمُ المذابِ المحاطُ بجزيئاتِ المذيبِ***، كما يظهرُ في نموذجِ الشكلِ 1-9، ***يسمَّى المتذاوبَ*** **solvated**.

يمكنُنا أن نتصوَّرَ تكوُّنَ المحلولِ على أنه نتيجةٌ لثلاثِ خطواتٍ، يلخِّصُها الشكلُ 1-15.

الشكل 1-15 يبيِّنُ الرسمُ البيانيُّ تغيُّراتِ المحتوى الحراريِّ خلالَ تكوُّنِ المحلولِ. كيف يختلفُ هذا الرسمُ إذا بنيَ ليناسبَ نظامًا تكونُ فيه عمليَّةُ الإذابةِ ماصَّةً للحرارةِ؟



الجدول 1-5 حرارةُ المحلولِ (مذاب kJ/mol عند 25°C)

المادَّة	حرارةُ المحلولِ	المادَّة	حرارةُ المحلولِ
$AgNO_3(s)$	+22.59	$KOH(s)$	–57.61
$CH_3COOH(l)$	–1.51	$MgSO_4(s)$	+15.9
$HCl(g)$	–74.84	$NaCl(s)$	+3.88
$HI(g)$	–81.67	$NaNO_3(s)$	+20.50
$KCl(s)$	+17.22	$NaOH(s)$	–44.51
$KClO_3(s)$	+41.38	$NH_3(g)$	–30.50
$KI(s)$	+20.33	$NH_4Cl(s)$	+14.78
$KNO_3(s)$	+34.89	$NH_4NO_3(s)$	+25.69

الكمّيَّةُ من الطاقةِ الحراريَّةِ التي يمتصُّها أو يطلقُها محلولٌ عند إذابةِ كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من المذابِ تسمّى حرارةَ المحلولِ **heat of solution**. من خلالِ الشكل 1-16 تستطيعُ أن ترى أن حرارةَ المحلولِ تكونُ سالبةً (طاقةً منطلقةً) إذا كانَ مجموعُ الطاقةِ في الخطوةِ 1 والخطوةِ 2 أقلَّ من الطاقةِ المنطلقةِ في الخطوةِ 3. وتكونُ حرارةُ المحلولِ موجبةً (طاقةً ممتصَّةً) إذا كانَ مجموعُ الطاقةِ في الخطوةِ 1 والخطوةِ 2 أكبرَ من الطاقةِ المنطلقةِ في الخطوةِ 3.

أنت تعلمُ أن التسخينَ يسبِّبُ انخفاضًا في ذوبانيَّةِ غازٍ معيَّن. إذن عمليَّةُ إذابةِ الغازاتِ طاردةٌ للحرارة. فكيف يمكنُ لقيمِ حرارةِ المحلولِ الظاهرةِ في الجدولِ 1-5 أن تدعمَ القولَ بأن عمليَّةَ إذابةِ المذاباتِ الغازيَّةِ طاردةٌ للحرارة؟

في الحالةِ الغازيَّةِ تكونُ الجزيئاتُ متباعدةً بحيثُ لا تكونُ القوى البينيَّةُ فاعلةً عمليًّا بينَ الجزيئاتِ الغازيَّةِ. لذلك يكونُ التأثيرُ المتبادلُ بينَ جزيئاتِ المذابِ له تأثيرٌ ضعيفٌ في حرارةِ المحلولِ عند إذابةِ الغازات. وبالتالي عندَما يذابُ غازٌ في سائل تنطلقُ كمّيَّةٌ من الطاقةِ، لأنّ التجاذبَ بينَ المذابِ الغازيِّ وجزيئاتِ المذيبِ يفوقُ الطاقةَ اللازمةَ لفصلِ جزيئاتِ المذيبِ.

مراجعةُ القسم 1-2

1. لماذا تتوقَّعُ أن يكونَ ذوبانُ كتلةٍ من السكَّرِ في الشايِ الساخنِ أسرعَ منه في الشايِ المثلجِ؟

2. (أ) كيف يمكنُك أن تحضِّرَ محلولاً مشبعًا من السكَّرِ في الماءِ؟ (ب) كيف يمكنُك أن تجعلَ المحلولَ السابقَ محلولاً فوقَ مشبعٍ؟

3. علِّلْ: يذوبُ الإيثانولُ في الماءِ ولا يذوبُ رابعُ كلوريدِ الكربونِ في الماءِ.

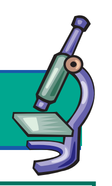
4. عندَما يتذاوبُ جزيءُ المذابِ (غيرُ الغازيِّ) ماذا يرافقُ تذاوبَه: امتصاصٌ للطاقةِ أم إطلاقٌ للطاقةِ؟

5. أيُّهما يفورُ بشكلٍ أقوى: زجاجةُ مشروبٍ غازيٍّ ساخنةٌ أم باردةٌ؟ ولماذا؟

تفكيرٌ ناقد

6. توقُّعُ نتائج: لطَّخْتَ ثيابَكَ كمِّيَّةٌ قليلةٌ من زيتِ التشحيمِ، فأيُّ المذيباتِ أفضلُ لإزالةِ هذا الزيتِ، التولوينُ أم الماءُ؟ فسِّرْ إجابتَك.

7. تفسيرُ مفاهيم: «مانعُ فورانٍ» تجاريٌّ يضخُّ غازَ الهيليومِ تحتَ الضغطِ في قنّينةِ مشروبٍ غازيٍّ، لحفظِ الغازِ من الانفلاتِ. هل سيحافظُ ذلك على CO_2 في قنّينةِ المشروبِ الغازيِّ؟ فسِّرْ إجابتَك.



قراءةٌ علميّةٌ

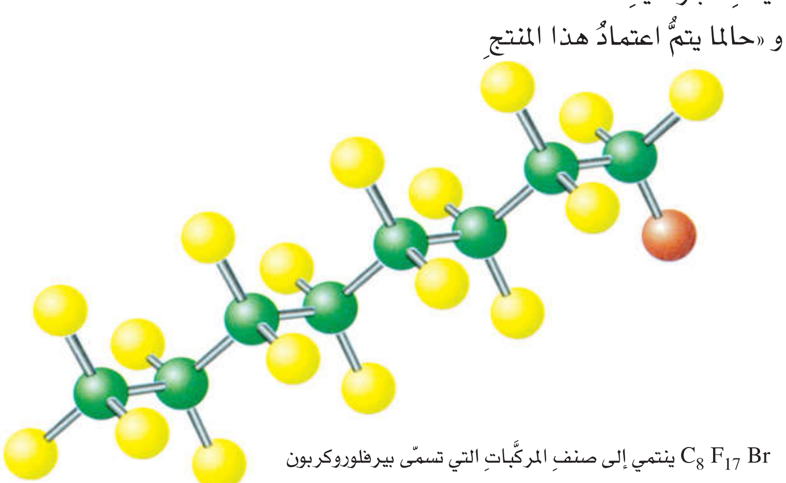
الدمُ الاصطناعيُّ

يرقدُ جريحٌ على حمّالةٍ وهو ينزفُ. فينحني الطبيبُ فوق الحمّالةِ ليكشفَ عن جرحِه، ويصدرُ تعليماتٍ لمرِّضةٍ بجانبِه، قائلاً: «قدِّمي له وحدةً من الدمِ الاصطناعيِّ». انسجامًا مع الدكتور بيتر كيبرت، مديرِ برنامجِ تطويرِ نقلِ الأكسجين في اتحادِ المنظّماتِ الصيدلانيَّةِ، فإن السيناريو الذي وردَ سابقًا قد يصبحُ مألوفًا بفضلِ خليطٍ تركيبيٍّ يستطيعُ أن يقومَ بواحدةٍ من الوظائفِ الأساسيَّةِ للدمِ، هي نقلُ الأكسجين.

يجمعُ الهيموجلوبينُ الموجودُ في خلايا الدمِ الأحمرِ الأكسجينَ من رئتَيْنا، ويحملُهُ إلى أنسجةِ الجسمِ، ثمَّ يعيدُ غازَ ثنائي أكسيدِ الكربونِ إلى الرئتَيْن. بديلُ الدمِ الذي يعملُ الدكتور كيبرت على تركيبِهِ يقومُ بالمهمَّةِ نفسِها، إلا أنه يستخدِمُ موادَّ كيميائيَّةً غيرَ قطبيَّةٍ، تُسمّى «البيرفلوروكربون»، وذلك لنقلِ الأكسجينِ بدلَ الهيموجلوبينِ. يتمُّ نقلُ موادِّ البيرفلوروكربونِ في محاليلَ مائيَّةٍ ملحيَّةٍ. لكنَّ غيرَ قطبيَّةِ هذه الموادِّ تجعلُها لا تختلطُ جيِّدًا بالماءِ. لذلك يضافُ إلى هذا الخليطِ مادَّةٌ كيميائيَّةٌ لاصقةٌ، تُسمّى المادَّةَ الخافضةَ للتوتُّرِ السطحيِّ، وذلك لتأمينِ تماسكِ الخليطِ. والحقيقةُ أن هذه الموادَّ اللاصقةَ تؤمِّنُ تجزئةَ البيرفلوروكربونِ إلى قطراتٍ صغيرةٍ ودقيقةٍ. هذه القطراتُ يجري تغليفُها بجزيئاتِ الموادِّ اللاصقةِ التي ترتبطُ في أحدِ أطرافِها بقطراتِ البيرفلوروكربونِ، وتتَّصلُ بالماءِ في الأطرافِ الأخرى، حيث يتمُّ إنتاجُ مستحلَبٍ أبيضَ. يُعطى المريضُ خليطَ بديلِ الدمِ المسمّى أكسجينت Oxygent™ بالطريقةِ نفسِها التي يُعطى بها الدمُ الطبيعيُّ. وفي نهايةِ الأمرِ يجري خروجُ البيرفلوروكربونِ بواسطةِ الرئتَيْنِ في عمليَّةِ الزفيرِ.

يعمَلُ الأكسجينتُ فقط على نقلِ الغازاتِ من الأنسجةِ وإليها. فهو لا يمكنُهُ أن يتخثَّرَ أو أن يقومَ بأيٍّ من وظائفِ جهازِ المناعةِ التي يؤدّيها الدمُ. مع ذلك يمتازُ بديلُ الدمِ عن الدمِ الحقيقيِّ بأفضليّاتٍ متعدِّدةٍ. فالأكسجينتُ له عمرُ تخزينٍ يمتدُّ إلى أكثرَ من سنةٍ. وهو يُسقِطُ العديدَ من المخاطرِ المرتبطةِ بعمليّاتِ نقلِ الدمِ. ولأن بديلَ الدمِ يستطيعُ أن يذيبَ كمِّيّاتٍ من الأكسجينِ أكبرَ من تلك التي ينقلُها الدمُ الحقيقيُّ، فإن الكمِّيّاتِ المستعملةَ منه أقلُّ.

حاليًّا يجري اختبارُ الأكسجينت في العمليّاتِ الجراحيَّةِ. و «حالما يتمُّ اعتمادُ هذا المنتجِ ويتبيَّنُ أنه آمنٌ وفعّالٌ في الجراحةِ المختارةِ، أعتقدُ أنك ستجدُ استعمالَهُ ينتشرُ في مجالِ الحالاتِ الحرجةِ الطارئةِ،» كما يقولُ الدكتور كيبرت. المصابُ الذي فقدَ كمِّيَّةً كبيرةً من الدمِ، والذي يجري إنعاشُهُ بالسوائلِ العاديَّةِ كالمحاليلِ الملحيَّةِ، يعطى في غرفةِ الطوارئِ مركَّبَ الأكسجينت كعاملٍ إضافيٍّ يساعدُ على تقديمِ الأكسجين.



$C_8F_{17}Br$ ينتمي إلى صنفِ المركَّباتِ التي تسمّى بيرفلوروكربون

أسئلة

1. كيف يُفيدُ اعتمادُ الأكسجينت المجتمعَ الطبّيَّ؟
2. كيف يمنعُ العلماءُ انفصالَ البيرفلوروكربونِ في الأكسجينت عن الماءِ؟
3. بمَ يتميَّزُ الأكسجينتُ من الدمِ البشريِّ؟
4. هل تتوقَّعُ أن يكونَ لاستخدامِ الأكسجينتِ تأثيرٌ في انتقالِ مرضِ نقصِ المناعةِ المكتسبةِ AIDS؟

القسم 1-3

مؤشّراتُ الأداء

- يحسبُ تركيزَ محلولٍ معيّنٍ مستخدِمًا كتلةَ المذابِ وحجمَ المذيبِ.
- يحدِّدُ كمّيَّةَ المذابِ في كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من المحلولِ مستخدِمًا تركيزَ المحلولِ.
- يحدِّدُ كمّيَّةَ المحلولِ الذي يحتوي على كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من المذابِ مستخدِمًا تركيزَ المحلولِ.

تركيزُ المحاليلِ

تركيزُ المحلولِ concentration *هو قياسٌ لكمّيَّةِ المذابِ في كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من المذيبِ أو المحلولِ*. بعضُ الأدويةِ هي محاليلُ للعقاقيرِ. وقد تشفي ملعقةٌ صغيرةٌ منها المريضَ إذا كانَ تركيزُها صحيحًا ودقيقًا، بينما يمكنُ أن تؤدّيَ الكمّيَّةُ نفسُها إلى الموتِ إذا كانَ تركيزُها خطأً.

في هذا القسمِ ستتعرَّفُ طريقتَيْنِ مختلفتَيْنِ للتعبيرِ عن تركيزِ المحاليلِ، هما: المولاريَّةُ والمولاليَّةُ.

أحيانًا يُطلقُ على المحلولِ صفةُ «المخفَّف» أو صفةُ «المركَّز»، لكنَّ هاتَيْنِ الصفتَيْنِ غيرُ محدَّدتَيْنِ وغيرُ دقيقتَيْنِ. فصفةُ «المخفَّف» تعني أن كمّيَّةَ المذابِ الموجودةَ في المذيبِ هي نسبيًّا قليلةٌ. ومن ناحيةٍ أخرى تعني صفةُ «المركَّز» أن كمّيَّةَ المذابِ الموجودةَ في المذيبِ هي كمّيَّةٌ كبيرةٌ نسبيًّا. ومن الجديرِ بالملاحظةِ أن الصفتَيْنِ المذكورتَيْنِ ليس لهما أيُّ علاقةٍ بدرجةِ تشبُّعِ المحلولِ، ذلك أن محلولاً مشبعًا بمادَّةٍ ليسَتْ ذاتَ قابليَّةٍ جيدةٍ للذوبانِ، يمكنُ أن يكونَ محلولاً مخفَّفًا جدًّا.

المولاريَّةُ

المولاريَّةُ molarity *هي عددُ مولاتِ المذابِ الموجودةِ في لترٍ واحدٍ من المحلولِ*. ولربطِ مولاريَّةِ محلولٍ معيَّنٍ بكتلةِ المذابِ الموجودةِ فيه، يلزمُ أن تُعرفَ الكتلةُ الموليّةُ لهذا المذابِ. فعلى سبيلِ المثالِ، يحتوي محلولٌ «1 مولار 1 molar» لهيدروكسيدِ الصوديومِ NaOH، على مولٍ واحدٍ من NaOH في كلِّ لترٍ من المحلولِ. يُرمزُ إلى المولاريَّةِ بالحرفِ M، ويعبَّرُ عن تركيزِ محلولِ 1 مولار من هيدروكسيدِ الصوديومِ بالكتابةِ 1 M NaOH.

كتلةُ مولٍ واحدٍ من NaOH تبلغُ 40.0 g. إذا أُذيبَتْ هذه الكمّيَّةُ من NaOH في مقدارٍ كافٍ من الماءِ للحصولِ بدقَّةٍ على 1.00 L من المحلولِ، فهذا يعتبرُ محلولَ 1 M. وإذا أُذيبَ 20.0 g من NaOH، وهي تساوي 0.500 mol. في كمّيَّةٍ كافيةٍ من الماءِ للحصولِ بدقَّةٍ على 1.00 L من المحلولِ، فإن تركيزَ المحلولِ الناتجِ هو 0.500 M NaOH. هذه العلاقةُ بين المولاريَّةِ وعددِ المولاتِ وحجمِ المحلولِ، يمكنُ التعبيرُ عنها كالتالي:

$$\text{المولاريَّةُ (M)} = \frac{\text{عددَ مولاتِ المذابِ (mol)}}{\text{حجمِ المحلولِ (L)}}$$

$$= \frac{0.500 \text{ mol NaOH}}{1.00 \text{ L}}$$

$$= 0.500 \text{ M NaOH}$$

إذا أُذيبَ ضعفُ الكتلةِ الموليَّةِ من NaOH، أي 80.0 g، في كمّيَّةٍ كافيةٍ من الماءِ للحصولِ على 1 L من المحلولِ، فإن تركيزَ المحلولِ الناتجِ هو 2 M. يمكنُ حسابُ المولاريَّةِ لأيِّ محلولٍ بقسمةِ عددِ مولاتِ المذابِ على عددِ لتراتِ المحلولِ.

تجدرُ الملاحظةُ أن محلولَ 1 مولار لا يحضَّرُ بإضافةِ 1 mol من المذابِ في 1 L من المذيبِ. لأن الحجمَ الكلّيَّ للمحلولِ، في هذه الحالةِ، قد لا يكونُ 1 L. وعوضًا عن ذلك، يُذابُ 1 mol من المذابِ في أقلَّ من 1 L من المذيبِ، ثم يخفَّفُ المحلولُ الناتجُ بكلِّ انتباهٍ بكمّيَّةٍ من الماءِ للحصولِ على حجمٍ كليٍّ يساوي 1 L، كما يظهرُ في الشكلِ 1-16.

الشكل 1-16 يبيِّنُ مراحلَ تحضيرِ محلولِ 0.5000 M من $CuSO_4•5H_2O$.

1 ابدأ بحسابِ الكتلةِ اللازمةِ من $CuSO_4•5H_2O$، لتحضيرِ لترٍ واحدٍ من هذا المحلولِ. يحتاجُ إلى 0.5000 mol من المذابِ. حوِّلْ عددَ المولاتِ إلى كتلةٍ، وذلك بضربِ هذا العددِ في الكتلةِ الموليَّةِ لـ $CuSO_4•5H_2O$. هذه الكتلةُ تساوي 124.8 g.

2 أضفْ بعضَ المذيبِ إلى كتلةِ المذابِ المحسوبةِ، وذلك بهدفِ إذابتِها، ثم اسكبِ المحلولَ في دورقٍ حجميٍّ سعتُه 1.0 L.

3 اغسلْ وعاءَ الوزنِ بكمّيَّةٍ من الماءِ لإزالةِ كلِّ آثارِ المذابِ واسكبْها في الدورقِ. أضفْ كمّيَّةً من الماءِ ليقتربَ حجمُ المحلولِ من عنقِ الدورقِ.

4 ضعْ سدادةَ الدورقِ وحرِّكِ المحلولَ بشكلٍ جيِّدٍ.

5 املأ، بانتباهٍ شديدٍ، الدورقَ بالماءِ حتى علامةِ 1.0 L.

6 أعِدْ سدادةَ الدورقِ واقلبْهُ عشرَ مرّاتٍ على الأقلِّ حتى تتحقّقَ أن الخلطَ قد اكتملَ.

7 المحلولُ الناتجُ يحتوي على كمّيَّةِ 0.5000 mol من المذابِ ذائبًا في 1 L من المحلولِ الذي يبلغُ تركيزُه 0.5000 M.

المسألةُ النموذجيَّةُ التاليةُ تبيِّنُ لك كيف تَستخدمُ المولاريَّةَ في أغلبِ الأحيانِ.

مسألةٌ نموذجية 1-1

لديك 3.50 L من محلولٍ يحتوي على 90.0 g من كلوريدِ الصوديومِ NaCl، ما مولاريَّةُ هذا المحلولِ؟

الحلّ

1 حلّل

المعطى: كتلةُ المذابِ = 90.0 g من NaCl

حجمُ المحلولِ = 3.50 L

المجهول: مولاريَّةُ محلولِ NaCl

2 خطّطْ

المولاريَّةُ هي عددُ مولاتِ المذابِ في لترٍ واحدٍ من المحلولِ. يوصفُ المذابُ في المسألةِ بكتلتِهِ وليسَ بعددِ المولاتِ. إذن أنت تحتاجُ إلى تحويلِ الجراماتِ إلى مولاتٍ من المذابِ، مستخدمًا معكوسَ الكتلةِ الموليَّةِ لـ NaCl لتصلَ إلى جوابِك.

جراماتُ المذابِ ← عددَ مولاتِ المذابِ ← المولاريَّة

$$g\ NaCl \times \frac{1\ mol\ NaCl}{g\ NaCl} = mol\ NaCl$$

$$\text{المولاريَّة (M)} = \frac{\text{كمّيَّةُ المذابِ (mol)}}{\text{حجمِ المحلولِ (L)}}$$

3 احسبْ

ستحتاجُ إلى الكتلةِ الموليَّةِ لـ NaCl.

NaCl = 58.44 g/mol

$$90.0\ \cancel{g\ NaCl} \times \frac{1\ mol\ NaCl}{58.44\ \cancel{g\ NaCl}} = 1.54\ mol\ NaCl$$

$$\frac{1.54\ mol\ NaCl}{3.50\ L\ \text{من المحلول}} = 0.440\ M\ NaCl$$

4 قيِّمْ

إن كلَّ عددٍ مشاركٍ قد حدِّدَ بثلاثةِ أرقامٍ معنويَّةٍ،لذلك يجبُ أن يتضمَّنَ الجوابُ ثلاثةَ أرقامٍ معنويَّةً. تُختصرُ الوحداتُ بشكلٍ صحيحٍ لتعطيَ المولاتِ المطلوبةَ من المذابِ في لترٍ من المحلولِ، وهذا ما يعطي بدورِهِ المولاريَّةَ.

مسألةٌ نموذجية 2-1

لديك 0.8 L من محلولٍ 0.5 M HCl. ما عددُ مولاتِ HCl التي يحتوي عليها هذا المحلولُ؟

الحلّ

1 حلّل

المعطى: حجمُ المحلولِ = 0.8 L

تركيزُ المحلولِ = 0.5 M HCl

المجهول: عددُ مولاتِ HCl الموجودةِ في حجمٍ محدَّدٍ

2 خطّطْ

تدلُّ المولاريّةُ على عددِ مولاتِ المذابِ الموجودةِ في لترٍ واحدٍ من المحلول. فإذا أُعطيَ حجمُ المحلولِ يمكنُنا إيجادُ عددِ مولاتِ المذابِ.

تركيزُ المحلولِ (mol HCl/L) × حجمِ المحلولِ (L) = عددَ مولاتِ HCl

3 احسبْ

$$\frac{0.5 \text{ mol HCl}}{1.0 \text{ L من المحلول}} \times 0.8 \text{ L من المحلول} = 0.4 \text{ mol HCl}$$

4 قيِّمْ

الجوابُ مُعطًى هنا بشكلٍ صحيحٍ برقمٍ معنويٍّ واحدٍ. تُختصرُ الوحداتُ بشكلٍ صحيحٍ لتبقى الوحدةُ المميِّزةُ للمجهولِ mol.

مسألةٌ نموذجية 3-1

يمكنُ ترسيبُ الفضّةِ من محاليلِها باستخدامِ ملحِ كروماتِ البوتاسيوم K_2CrO_4. فما الحجمُ اللازمُ من محلولِ K_2CrO_4، تركيزُهُ 6.0 M، لإعطاءِ 23.4 g K_2CrO_4 الضروريَّةِ لأحدِ تفاعلاتِ ترسيبِ الفضَّةِ؟

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: تركيزُ المحلولِ = 6.0 M K_2CrO_4

كتلةُ المذابِ = 23.4 g K_2CrO_4

المجهول: حجمُ محلولِ K_2CrO_4 باللترِ (L)

2 خطِّطْ

تدلُّ المولاريَّةُ على عددِ مولاتِ المذابِ في 1 L من المحلولِ. إذا أُعطيَتْ كتلةُ المذابِ اللازمةُ، يمكنُ إيجادُ عددِ مولاتِ المذابِ. استخدمِ المولاريَّةَ وكمّيَّةَ K_2CrO_4 بالمولاتِ لتحديدِ الحجمِ اللازمِ من محلولِ K_2CrO_4 لتأمينِ 23.4 g.

جراماتُ المذابِ ← مولاتِ المذابِ

مولاتُ المذابِ والمولاريَّةُ ← حجمَ المذابِ الضروريِّ باللتراتِ

3 احسبْ

للحصولِ على عددِ مولاتِ المذابِ تحتاجُ إلى حسابِ الكتلةِ الموليَّةِ لـ K_2CrO_4.

$$1 \text{ mol } K_2CrO_4 = 194.2 \text{ g } K_2CrO_4$$

$$23.4 \text{ g } K_2CrO_4 \times \frac{1 \text{ mol } K_2CrO_4}{194.2 \text{ g } K_2CrO_4} = 0.120 \text{ mol } K_2CrO_4$$

$$\frac{0.120 \text{ mol } K_2CrO_4}{x \text{ L من محلول } K_2CrO_4} = 6.0 \text{ M } K_2CrO_4$$

$$x = 0.020 \text{ L من محلول } K_2CrO_4$$

4 قيِّمْ

الجوابُ معطى بشكلٍ صحيحٍ، برقمَيْنِ معنويَّيْنِ. تُختَصرُ الوحداتُ بشكلٍ صحيحٍ فتبقى الوحدةُ المطلوبةُ، وهي لتراتٌ من المحلولِ.

تمارينُ تطبيقية

1. ما مولاريَّةُ المحلولِ الناتجِ من إذابةِ 5.85 g من يوديدِ البوتاسيومِ KI، في كمّيَّةٍ كافيةٍ من الماءِ ليعطيَ حجمًا مقدارُهُ 0.125 L من المحلولِ؟
2. ما عددُ مولاتِ H_2SO_4 الموجودِ في 0.500 L من محلولِ H_2SO_4 0.150 M؟
3. ما حجمُ محلولِ NaCl 3.00 M اللازمُ لتفاعلٍ يتطلَّبُ 146.3 g من NaCl؟

الجواب

1. 0.282 M KI
2. 0.0750 mol
3. 0.834 L

المولاليَّةُ

المولاليَّةُ **molality** *هي تركيزُ المحلولِ الذي يعبِّرُ عن عددِ مولاتِ المذابِ في كيلوجرامٍ من المذيبِ.* فمثلاً، المحلولُ الذي يحتوي على 1 mol من المذابِ، هيدروكسيدِ الصوديومِ NaOH الذائبِ في كيلوجرامٍ من المذيبِ، هو محلولُ 1 مولل (1 molal). يُرمزُ إلى المولاليَّةِ بحرفِ m ويعبَّرُ عن تركيزِ هذا المحلولِ بالكتابةِ 1 m NaOH.

كتلةُ مولٍ واحدٍ من NaOH تبلغُ 40.0 g. فإذا أُذيبَ 40.0 g من NaOH في كيلوجرامٍ من الماءِ فالمحلولُ الناتجُ هو محلولُ NaOH وتركيزُهُ 1 m. وإذا أُذيبَ 20.0 g من NaOH ما يساوي 0.500 mol NaOH، في كيلوجرامٍ من الماءِ فإن تركيزَ المحلولِ الناتجِ يكونُ 0.500 m NaOH.

$$\text{المولاليَّةُ} = \frac{\text{عددَ مولاتِ المذابِ (mol)}}{\text{كتلةِ المذيبِ (kg)}}$$

$$\frac{0.500 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ kg } H_2O} = 0.500\ m \text{ NaOH}$$

وإذا أُذيبَ 80.0 g من هيدروكسيدِ الصوديومِ، ما يساوي 2 mol، في كيلوجرامٍ من الماءِ فإن تركيزَ المحلولِ NaOH الناتجِ يكونُ 2.00 m. يمكنُ إيجادُ مولاليَّةِ أيِّ محلولٍ بقسمةِ عددِ مولاتِ المذابِ على كتلةِ المذيبِ بالكيلوجرامِ. تجدرُ الإشارةُ إلى وجوبِ تحويلِ كتلةِ المذيبِ إلى كيلوجراماتٍ إذا كانَتْ كتلتُهُ معطاةً بالجراماتِ، وذلك بضربِ هذه الكتلةِ بمُعاملِ التحويلِ التالي:

$$1 \text{ kg}/1000\text{g}$$

يبيِّنُ الشكلُ 1-17 كيفيةَ تحضيرِ محلولِ 0.5000 m من $CuSO_4•5H_2O$.

الشكل 1-17 يبدأُ تحضيرُ محلولِ 0.5000 m من $CuSO_4•5H_2O$ بحسابِ كتلةِ المذابِ اللازمةِ.

1 احسبِ الكتلةَ اللازمةَ من $CuSO_4•5H_2O$. يتطلَّبُ تحضيرُ هذا المحلولِ 0.5000 mol من $CuSO_4•5H_2O$ في كيلوجرامٍ من المذيبِ (1000g). حسابُ هذه الكتلةِ يعطي 124.8 g.

2 أضفْ 1.000 kg من المذيبِ إلى المذابِ الموجودِ في الوعاءِ. وبما أن المذيبَ هو ماءٌ، فإن 1.000kg تعادلُ 1000 mL.

3 اخلطْ بشكلٍ تامٍّ.

4 المحلولُ الناتجُ يحتوي على 0.5000 mol من المذابِ ذائبةً في 1.000 kg من المذيبِ.

يُعبَّرُ عن التركيزِ بالمولاليَّةِ عندما يُرادُ دراسةُ خصائصِ المحاليلِ التي لها علاقةٌ بتغيُّراتِ الضغطِ البخاريِّ ودرجةِ الحرارةِ، حيثُ تستخدمُ المولاليَّةُ لأنها لا تتغيَّرُ بتغيُّرِ درجةِ الحرارةِ. المعادلتانِ التاليتانِ تمثِّلانِ مقارنةً بينِ المولاريَّةِ والمولاليَّة.

$$\text{المولاريَّةُ } (M) = \frac{\text{كمّيَّةُ المذابِ (mol)}}{\text{حجمِ المحلولِ (L)}}$$

$$\text{المولاليَّةُ } (m) = \frac{\text{كمّيَّةُ المذابِ (mol)}}{\text{كتلةُ المذيبِ (kg)}}$$

مسألةٌ نموذجية 4-1

احسبِ التركيزَ المولاليَّ لمحلولٍ محضَّرٍ بإذابةِ 17.1 g من السكَّرِ $C_{12}H_{22}O_{11}$، في 125 g من الماءِ.

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: كتلةُ المذابِ = 17.1 g من $C_{12}H_{22}O_{11}$

كتلةُ المذيبِ = 125 g H_2O

المجهول: التركيزُ المولاليُّ

2 خطِّطْ

لإيجادِ المولاليَّةِ تحتاجُ إلى عددِ مولاتِ المذابِ وكتلةِ المذيبِ بالكيلوجرامِ. ينبغي تحويلُ كتلةِ السكَّرِ من الجرامِ إلى مولاتٍ وكذلك تحويلُ كتلةِ المذيبِ من الجرامِ إلى الكيلوجرامِ.

$$\text{mol } C_{12}H_{22}O_{11} = \frac{\text{g } C_{12}H_{22}O_{11}}{\text{الكتلةِ الموليَّةِ لـ } C_{12}H_{22}O_{11}}$$

$$\text{kg } H_2O = \text{g } H_2O \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}$$

$$\text{مولاليَّةُ } C_{12}H_{22}O_{11} = \frac{\text{mol } C_{12}H_{22}O_{11}}{\text{kg } H_2O}$$

3 احسبْ

استخدمِ الجدولَ الدوريَّ للعناصرِ لحسابِ الكتلةِ الموليَّةِ لـ $C_{12}H_{22}O_{11}$.

$C_{12}H_{22}O_{11}$ = 342.34 g/mol

$$17.1 \text{ g } \cancel{C_{12}H_{22}O_{11}} \times \frac{1 \text{ mol } C_{12}H_{22}O_{11}}{342.34 \text{ g } \cancel{C_{12}H_{22}O_{11}}} = 0.0500 \text{ mol } C_{12}H_{22}O_{11}$$

$$125 \text{ g } \cancel{H_2O} \times \frac{1 \text{ kg } H_2O}{1000 \text{ g } \cancel{H_2O}} = 0.125 \text{ kg } H_2O$$

$$\frac{0.0500 \text{ mol } C_{12}H_{22}O_{11}}{0.125 \text{ kg } H_2O} = 0.400\ m\ C_{12}H_{22}O_{11}$$

4 قيِّمْ

الجوابُ معطى بشكلٍ صحيحٍ، بثلاثةِ أرقامٍ معنويَّةٍ. الوحدةُ (مذيب kg/ مذاب mol) هي الوحدةُ الصحيحةُ للمولاليَّةِ.

مسألةٌ نموذجية 5-1

عندَما تدعو الحاجةُ إلى اليودِ I_2، لإجراءِ بعضِ الاختباراتِ الكيميائيَّة، فإنه يُستخدَمُ بشكل محلولٍ في رابعِ كلوريدِ الكربونِ CCl_4. ما كتلةُ اليودِ الواجبُ إضافتُها إلى CCl_4 لتحضيرِ محلولِ يود $0.480\ m$ إذا استعملْنا $100.0\ g$ من CCl_4؟

الحلّ

1 حلّل **المعطى:** مولاليَّةُ المحلولِ = $0.480\ m\ I_2$

كتلةُ المذيبِ = $100.0\ g\ CCl_4$

المجهول: كتلةُ المذابِ I_2

2 خطّطْ الخطوةُ الأولى الواجبُ اتِّباعُها هي تحويلُ جراماتِ المذيبِ إلى كيلوجرامات. المولاليَّةُ تعطيكَ عددَ مولاتِ المذابِ الذي يمكنُ تحويلُهُ إلى جراماتٍ، وذلك باستخدامِ كتلةِ اليودِ I_2 الموليَّةِ.

3 احسبْ استخدمِ الجدولَ الدوريَّ للعناصرِ لحسابِ الكتلةِ الموليَّةِ لليودِ I_2.

$I_2 = 253.8\ g/mol$

$$100.0\ g\ CCl_4 \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = 0.100\ kg\ CCl_4$$

$$0.480\ m = \frac{x\ mol\ I_2}{0.1\ kg\ CCl_4} \qquad x = 0.0480\ mol\ I_2$$

$$0.0480\ \cancel{mol\ I_2} \times \frac{253.8\ g\ I_2}{\cancel{mol\ I_2}} = 12.2\ g\ I_2$$

4 قيّمْ يتكوّنُ الجوابُ من ثلاثةِ أرقامٍ معنويَّةٍ ومن وحدةِ الكتلةِ لـ I_2.

تمارينُ تطبيقية

1. ما مولاليَّةُ الأسيتونِ في محلولٍ تمَّ تحضيرُهُ بإذابةِ $225\ g$ أسيتون $(CH_3)_2CO$، في $200.\ g$ من الماء؟
2. ما كمّيَّةُ الميثانولِ CH_3OH، بالجرامات، اللازمةُ لتحضيرِ محلولِ ميثانول $0.244\ m$ في $400.\ g$ من الماء؟

الجواب

1. $22.0\ m$ أسيتون
2. $3.13\ g\ CH_3OH$

مراجعةُ القسمِ 3-1

1. ما الكمّيَّةُ التي تمثِّلُ نسبةَ عددِ مولاتِ المذابِ على حجمِ المحلولِ باللتر؟
2. إذا أذبْنا $5.00\ g$ من السكّرِ $C_{12}H_{22}O_{11}$، في الماءِ لنحصلَ على $1.000\ L$ من المحلول، فكم تكونُ مولاريَّةُ هذا المحلول؟

تفكيرٌ ناقد

3. **تحليلُ بيانات:** عند تبخيرِ كلِّ الماءِ من $100.\ mL$ من محلولِ $NaCl$ تحصلُ في النهايةِ على $11.3\ g$ من $NaCl$. كم تكونُ مولاريَّةُ محلولِ $NaCl$؟
4. **ترابطُ أفكار:** لنفترضْ أنك تعرفُ مولاريةَ محلولٍ معيَّن، فأيُّ معلوماتٍ إضافيَّةٍ يمكنُ أن تحتاجَ إليها لحسابِ مولاليَّةِ هذا المحلول؟

مراجعةُ الفصل 1

ملخّصُ الفصل

1-1

- المحاليلُ هي مخاليطُ متجانسةٌ.
- تصنَّفُ المخاليطُ إلى محاليلَ أو معلَّقات أو غرويّاتٍ، وذلك تبعًا لحجم جسيماتِ المذابِ في الخليطِ.
- المادّةُ الذائبةُ تُسمّى المذابَ. وتُسمّى المحاليلُ التي يدخلُ فيها الماءُ كمذيبٍ محاليلَ مائيَّةً.
- يمكنُ للمحاليل أن تتكوَّنَ من مذاباتٍ ومذيباتٍ صلبةٍ، أو سائلةٍ أو غازيَّةٍ.
- المعلَّقاتُ تترسَّبُ إذا كانَتْ في حالةِ الركودِ، بينما لا تترسَّبُ الغرويّاتُ التي تتميَّزُ بتشتيتِ الضوءِ الذي يمرُّ خلالَها.
- معظمُ المذاباتِ الأيونيَّةِ وبعضُ المذاباتِ الجزيئيَّةِ تكوِّنُ محاليلَ مائيَّةً موصِّلةً للتيّارِ الكهربائيِّ. هذه المذاباتُ تُسمّى الإلكتروليتاتِ.
- اللاإلكتروليتاتُ هي مذاباتٌ تذوبُ في الماءِ لتكوِّنَ محاليلَ غيرَ موصِّلةٍ للتيّارِ الكهربائيِّ.

المفردات

(10) solution المحلول

(10) solvent المذيب

(10) solute المذاب

(11) suspension المعلَّق

(11) colloids الغرويّات

(13) electrolyte الإلكتروليت

(13) nonelectrolyte اللاإلكتروليت

2-1

- تعتمدُ سرعةُ ذوبانِ المذابِ على مساحةِ سطحِه، وقوةِ تحريكِ المحلولِ، ودرجةِ حرارةِ المذيبِ.
- تدلُّ ذوبانيَّةُ مادَّةٍ معيَّنةٍ على الكمّيَّةِ التي تذوبُ من هذه المادَّةِ في كمّيّةٍ محدَّدةٍ من المذيبِ، تحتَ ظروفٍ محدَّدةٍ.
- تعتمدُ ذوبانيَّةُ مادةٍ معيَّنةٍ على درجةِ الحرارةِ.
- تزدادُ ذوبانيَّةُ الغازاتِ في السوائلِ عندَما يزدادُ الضغطُ.
- تنخفضُ ذوبانيَّةُ الغازاتِ في السوائلِ عندَما ترتفعُ درجةُ الحرارةِ.
- عندَ إذابةِ كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من المذابِ فإن التغيُّرَ الكلّيَّ للطاقةِ الذي يحصلُ خلالَ عمليّةِ تكوُّنِ المحلولِ يُسمّى حرارةَ المحلولِ.

المفردات

(16) solution equilibrium اتزانُ المحلول

(17) saturated solution المحلولُ المشبع

المحلولُ غيرُ المشبع (17) unsaturated solution

المحلولُ فوقَ المشبع (17) supersaturated solution

(17) solubility الذوبانيَّة

(19) hydration التميُّؤ

(20) immiscible غيرُ القابلِ للامتزاج

(20) miscible القابلُ للامتزاج

(21) Henry's law قانونُ هنري

(21) effervescence الفوران

(23) solvated المتذاوب

(24) heat of solution حرارةُ المحلول

3-1

- المولاريَّةُ والمولاليَّةُ مفهومانِ يعبِّرانِ عن التركيزِ.
- التركيزُ المولاريُّ للمحلولِ يمثِّلُ نسبةَ مولاتِ المذابِ على لتراتِ المحلولِ.
- التركيزُ المولاليُّ للمحلولِ يمثِّلُ نسبةَ مولاتِ المذابِ على كيلوجراماتِ المذيبِ.

المفردات

(26) concentration التركيز

(26) molarity المولاريَّة

(30) molality المولاليَّة

مراجعةُ الفصل 1

اختيارٌ من متعدِّدٍ

1. الماءُ مذيبٌ جيدٌ
   أ. لأنه مركّبٌ تساهميٌّ.
   ب. لأنه غيرُ موصِّلٍ للكهرباءِ.
   ج. لأنَّ جزيئاتِهِ قطبيَّةٌ.
   د. لأنه سائلٌ صافٍ وعديمُ اللونِ.

2. من المرجَّحِ ألاّ يمتزج سائلانِ إذا
   أ. كانَتْ جزيئاتُهما قطبيَّةً.
   ب. كانَتْ جزيئاتُهما غيرَ قطبيَّةٍ.
   ج. كانَتْ جزيئاتُ أحدِهما قطبيَّةً وجزيئاتُ الآخرِ غيرَ قطبيَّةٍ.
   د. كانَ أحدُهما ماءً والآخرُ ميثانولاً CH_3OH.

3. يمكنُ أن تزيدَ ذوبانيَّةُ غازٍ في سائلٍ بـ
   أ. إضافةِ إلكتروليتٍ.
   ب. إضافةِ مستحلبٍ.
   ج. تحريكِ المحلولِ.
   د. زيادةِ ضغطِهِ الجزئيِّ.

4. أيٌّ من المركَّباتِ التاليةِ يرجَّحُ أن تكونَ الإلكتروليتَ الأقوى؟
   أ. مركَّبٌ تساهميٌّ شبكيٌّ.
   ب. مركَّبٌ غيرُ قطبيٍّ.
   ج. مركَّبٌ تساهميٌّ.
   د. مركَّبٌ أيونيٌّ.

5. تحتَ أيٍّ من الشروطِ التاليةِ يصبحُ محلولٌ مشبعٌ محلولاً فوقَ مشبعٍ؟
   أ. إذا كانَ يحتوي على إلكتروليتاتٍ.
   ب. إذا سُخِّنَ المحلولُ ثم سمحَ له بأن يبردَ.
   ج. إذا أُضيفَ إلى المحلولِ كمّيَّةٌ أكبرُ من المذيبِ.
   د. إذا أُضيفَ إلى المحلولِ كمّيَّةٌ أكبرُ من المذابِ.

6. يُعبَّرُ عن المولاريَّةِ بوحدةِ قياسٍ هي
   أ. كمّيَّةُ مولاتِ المذابِ في لترٍ من المحلولِ.
   ب. عددُ لتراتِ المحلولِ لكلِّ مولٍ من المذابِ.
   ج. كمّيَّةُ مولاتِ المذابِ في لترٍ من المذيبِ.
   د. عددُ لتراتِ المذيبِ لكلِّ مولٍ من المذابِ.

7. ما كتلةُ NaOH الموجودةُ في 2.5 L من محلولٍ 0.010 M؟
   أ. 0.010 g
   ب. 1.0 g
   ج. 2.5 g
   د. 0.40 g

8. فيما يتعلَّقُ بذوبانيَّةِ الموادِّ، أيٌّ من العباراتِ التاليةِ غيرُ صحيحةٍ؟
   أ. الغازاتُ ،بشكلٍ عامٍّ، أكثرُ ذوبانيَّةً في الماءِ تحتَ ضغوطٍ عاليةٍ مما هي تحتَ ضغوطٍ منخفضةٍ.
   ب. عندما ترتفعُ درجةُ الحرارةِ، تزيدُ ذوبانيَّةُ بعضِ الموادِّ الصلبةِ في الماءِ، بينما تنخفضُ ذوبانيَّةُ موادَّ صلبةٍ أخرى في الماءِ.
   ج. يُذيبُ الماءُ العديدَ من المذيباتِ الأيونيَّةِ بسببِ قدرتِهِ على إماهةِ الأيوناتِ في المحلولِ.
   د. تذوبُ موادُّ صلبةٌ عديدةٌ في المذيبِ البارِدِ بأسرعَ من ذوبانِها في المذيبِ الساخنِ.

مراجعةُ المفاهيمِ

9. أ. ما ظاهرةُ تيندال؟
   ب. هاتِ مثالاً يوضِّحُ هذه الظاهرةَ.

10. لديكَ خليطٍ مجهولٍ مكوَّنٍ من مادتَيْنِ أو أكثرَ، وضِّحْ كيف يمكنُ تحديدُ نوعِ الخليطِ: هل هو محلولٌ حقيقيٌّ أم غرويٌّ أم معلَّقٌ؟

11. لماذا يُعتبرُ المعلَّقُ خليطًا غيرَ متجانسٍ؟

12. هل يجبُ أن يتضمَّنَ المحلولُ سائلاً؟ فسِّرْ إجابتَك.

13. ما الفرقُ بينَ الإلكتروليتِ واللاإلكتروليتِ؟

14. أ. ما المقصودُ باتزانِ المحلولِ؟
    ب. ما العواملُ التي تحدِّدُ الدرجةَ التي يصلُ عندَها المحلولُ إلى حالةِ اتزانِ مذابٍ–مذيبٍ؟

15. أ. ما المحلولُ المشبعُ؟
    ب. ما الدليلُ الذي يشيرُ إلى أن المحلولَ مشبعٌ؟
    ج. ما المحلولُ غيرُ المشبعِ؟

16. أ. ما المقصودُ بذوبانيَّةِ مادةٍ معيَّنةٍ؟
    ب. ما الشروطُ الواجبُ تحديدُها عند التعبيرِ عن ذوبانيَّةِ مادَّةٍ ما؟

17. أ. ما القاعدةُ المفيدةُ التي تسمحُ لنا بأن نتوقَّعَ إمكانيَّةَ ذوبانِ مادةٍ معيَّنةٍ في مادةٍ أخرى؟
    ب. صفْ ما تعنيهِ هذه القاعدةُ بالنسبةِ إلى مختلفِ الاحتمالاتِ بينَ المذاباتِ والمذيباتِ القطبيَّةِ وغيرِ القطبيَّةِ.

18. أ. كيف يؤثِّرُ الضغطُ في ذوبانيَّةِ غازٍ في سائلٍ؟
ب. أيُّ قانونٍ يعبِّرُ عن هذه العلاقةِ؟
ج. إذا زادَ ضغطُ غازٍ موجودٍ فوقَ سائلٍ ماذا يحصلُ لكميَّةِ الغازِ التي ستذوبُ في السائلِ، إذا بقيَتْ كلُّ الظروفِ الأخرى ثابتةً؟
د. فُتحتْ قنّينتانِ من مشروبٍ غازيٍّ، إحداهما باردةٌ والأخرى عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ. أي النظامَيْنِ سيظهرُ فورانًا أقوى؟ ولماذا؟

19. استنادًا إلى الشكل 1-14، حدِّدْ ذوبانية كلٍّ من المذاباتِ التاليةِ بـ g مذابٍ في 100. g ماءٍ.
أ. $NaNO_3$ عندَ درجةِ حرارةٍ 10°C
ب. KNO_3 عندَ درجةِ حرارةٍ 60°C
ج. NaCl عندَ درجةِ حرارةٍ 50°C

20. استنادًا إلى الشكل 1-14، عندَ أيِّ درجةِ حرارةٍ تتمُّ ملاحظةُ المستوياتِ التاليةِ للذوبانيَّةِ؟
أ. 50 g KCl في 100 g H_2O
ب. 100 g $NaNO_3$ في 100 g H_2O
ج. 60 g KNO_3 في 100 g H_2O

21. تبلغُ حرارةُ المحلولِ لـ $AgNO_3$: +22.8 kJ/mol.
أ. اكتبِ المعادلةَ التي تمثِّلُ ذوبانَ $AgNO_3$ في الماءِ.
ب. هل عمليَّةُ الإذابةِ ماصَّةٌ للحرارةِ أم طاردةٌ؟ هل عمليَّةُ التبلورِ ماصَّةٌ للحرارةِ أم طاردةٌ؟
ج. عندَما يذوبُ $AgNO_3$، أيُّ تغيُّرٍ يحصلُ في درجةِ حرارةِ المحلولِ؟
د. عندما يكونُ النظامُ في حالةِ اتِّزانٍ، كيف تقارنُ معدَّلَ سرعةِ الذوبانِ بمعدَّلِ سرعةِ الترسيبِ؟
هـ. انطلاقًا من حالةِ الاتزانِ،كيف تتأثَّرُ سرعتا الذوبانِ والترسيبِ إذا سُخِّنَ المحلولُ؟ لماذا؟
و. كيف يؤثِّرُ ارتفاعُ درجةِ الحرارةِ في كمِّيَّةِ المذابِ التي يمكنُ إذابتُها؟
ز. إذا سمحَ للمحلولِ أن يبلغَ حالةَ الاتِّزانِ، ثم بُرِّدَ، فكيف يتأثَّرُ النظامُ؟

22. ما العمليَّتانِ اللتانِ تكونانِ في حالةِ اتِّزانٍ في النظامِ المكوَّنِ من كلوريدِ الصوديومِ، الذي يظهرُ في الشكل 1-7؟

23. بأيِّ وحداتِ قياسٍ يتمُّ التعبيرُ عن المولاريَّةِ؟

24. بأيِّ ظروفٍ يفضَّلُ التعبيرُ عن تركيزِ المحلولِ
أ. بالمولاريَّةِ؟
ب. بالمولاليَّةِ؟

25. إذا أذبْتَ 2.00 mol من KI في 1.00 L من الماءِ، فَهل تحصلُ على محلولٍ 2.00 M؟ وضِّحْ إجابتَك.

مسائل

26. أ. لنفترضْ أنك أذبتَ 106 g من Na_2CO_3 في كمّيَّةٍ كافيةٍ من الماءِ H_2O، لتحصلَ على 6.00 L من المحلولِ.
(1) ما الكتلةُ الموليَّةُ لـ Na_2CO_3؟
(2) ما مولاريَّةُ هذا المحلولِ؟
ب. ما مولاريَّةُ محلولٍ حجمُه 150 mL ويحتوي على 14.0 g من NH_4Br؟

27. أ. لنفترضْ أنك تريدُ إنتاجَ 1.00 L من محلولٍ مائيٍّ لـ 3.5 M H_2SO_4.
(1) ما المذابُ في هذا المحلولِ؟
(2) ما المذيبُ؟
(3) كم جرامًا من المذابِ يلزمُ لتحضيرِ هذا المحلولِ؟
ب. كم جرامًا من المذابِ يلزمُ لتحضيرِ 2.50 L من محلولٍ 1.75 M $Ba(NO_3)_2$؟

28. ما عددُ مولاتِ NaOH الموجودةِ في 65.0 mL من محلولٍ 2.20 M NaOH؟ (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 1-2)

29. محلولٌ محضَّرٌ بإذابةِ 26.42 g من $(NH_4)_2SO_4$ في كمّيَّةٍ كافيةٍ من الماءِ للوصولِ إلى 50.00 mL من المحلولِ.
أ. ما الكتلةُ الموليَّةُ لـ $(NH_4)_2SO_4$؟
ب. ما مولاريَّةُ هذا المحلولِ؟

30. لنفترضْ أنك تريدُ حسابَ الحجمِ اللازمِ بالمليلتراتِ من محلولٍ 1.0 M $AgNO_3$ لتحضيرِ 169.9 g من $AgNO_3$ النقيِّ.
أ. ما الخطوةُ الأولى الواجبُ اتِّباعُها لحلِّ هذه المسألةِ؟
ب. ما الكتلةُ الموليَّةُ لـ $AgNO_3$؟
ج. ما الحجمُ الضروريُّ بالمليلتراتِ من المحلولِ؟

31. حددْ كتلةَ المذابِ بالجرامِ لتحضيرِ كلٍّ من المحاليلِ المولاليَّةِ التاليةِ:
أ. محلولٍ 4.50 *m* H_2SO_4 في 1.00 kg من الماءِ.
ب. محلولٍ 1.00 *m* HNO_3 في 2.00 kg من الماءِ.

32. محلولٌ محضَّرٌ بإذابةِ 17.1 g من السكَّرِ $C_{12}H_{22}O_{11}$، في 275 g من الماء H_2O.

أ. ما الكتلةُ المولية للسكَّر؟

ب. ما مولاليَّةُ هذا المحلول؟

33. ما عددُ كيلوجراماتِ الماءِ التي يجبُ إضافتُها إلى 75.5 g من $Ca(NO_3)_2$ لتكوينِ محلول $0.500\ m$؟

34. تبلغُ مولاليَّةُ محلولٍ محضَّرٍ من الإيثانول C_2H_5OH والماءِ $1.75\ m$. ما عددُ جراماتِ الإيثانولِ الموجودةِ في 250. g من الماءِ؟

مراجعةٌ متنوِّعة

35. أذيبَتْ كمّيَّةٌ من Na_2SO_4 في الماءِ لتكوينِ محلولٍ حجمُهُ 450. mL وتركيزُهُ 0.250 M.

أ. ما الكتلةُ الموليَّةُ لـ Na_2SO_4؟

ب. ما العددُ اللازمُ من مولاتِ Na_2SO_4؟

36. حمضُ السيتريك هو أحدُ مكوِّناتِ بعضِ المرطِّبات. لنفترضْ أن 2.00 L من المحلولِ حُضِّرتْ من 150. mg من حمضِ السيتريك $C_6H_8O_7$.

أ. ما الكتلةُ الموليَّةُ لحمضِ السيتريك؟

ب. ما مولاريَّةُ حمضِ السيتريك في المحلول؟

37. لنفترضْ أنك تريدُ أن تعرفَ عددَ جراماتِ KCl التي ستبقى بعد التبخيرِ الكاملِ (حتّى الجفاف) لـ 350 mL من محلولِ 6.0 M KCl.

أ. ما الكتلةُ الموليَّةُ لـ KCl؟

ب. كيف يؤثِّرُ تسخينُ المحلولِ في الكتلةِ الباقيةِ من KCl؟

ج. ما عددُ الجراماتِ الباقيةِ من KCl؟

38. يُستخدمُ جليكولُ الإيثيلين $C_2H_6O_2$ في السيّاراتِ كمادَّةٍ مبرِّدةٍ وكمضادٍّ للتجمُّد. يملأُ ميكانيكيٌّ مبرِّدَ سيارةٍ بـ 6.5 kg من جليكولِ الإيثيلين و 1.5 kg من الماءِ.

أ. ما الكتلةُ الموليَّةُ لجليكولِ الإيثيلين؟

ب. ما مولاليَّةُ الماءِ في المحلول؟

39. ارسمْ خطًّا بيانيًّا لذوبانيَّةِ $AgNO_3$ مستندًا إلى البياناتِ التالية، على أن يمثِّلَ المحورُ العموديُّ كتلةَ المذابِ بالجرامِ (بتزايد 50) في 100 g من H_2O، والمحورُ الأفقيُّ درجةَ الحرارةِ بـ °C.

كتلةُ المذابِ بالجرامِ في 100 g H_2O	درجةُ الحرارة (°C)
122	0
216	30
311	40
440	60
585	80
733	100

ثم أجبْ عن الأسئلةِ التالية:

أ. كيف تتغيَّرُ ذوبانيَّةُ $AgNO_3$ مع تغيُّرِ درجةِ حرارةِ الماءِ؟

ب. قدِّرْ ذوبانيَّةَ $AgNO_3$ عند درجاتِ الحرارةِ 35°C، 55°C، 75°C.

ج. عند أيِّ درجةٍ للحرارةِ تقدَّرُ ذوبانيَّةُ $AgNO_3$ بـ 275 g في 100 g من H_2O؟

د. إذا أضيفَ 100 g من $AgNO_3$ إلى 100 g من H_2O عندَ درجةِ حرارةِ 10°C، هل يكونُ المحلولُ الناتجُ مشبعًا أم غيرَ مشبع؟ ماذا يحدثُ إذا أضفنا 325 g من $AgNO_3$ إلى 100 g من H_2O عند درجةِ حرارةِ 35°C؟

40. إذا بُرِّدَ محلولٌ مشبعٌ من KNO_3 في 100. g من H_2O من درجةِ حرارةِ 60°C إلى 20°C. كم جرامًا من المذابِ يترسَّبُ في المحلول؟ (استخدمِ الجدولَ 1-4)

41. أ. لنفترضْ أنك تريدُ إذابةَ 294.3 g من H_2SO_4 في 1.000 kg من H_2O.

(1) ما المذابُ في هذا المحلول؟

(2) ما المذيبُ؟

(3) ما مولاليَّةُ هذا المحلول؟

ب. ما مولاليَّةُ محلولٍ مكوَّنٍ من 63.0 g HNO_3 في 0.250 kg من H_2O؟

تفكيرٌ ناقد

42. توقعُ نتائج: إذا استقصيتَ طبيعةَ المعلّقاتِ والغرويّاتِ والمحاليلِ، وجمعْتَ البياناتِ التاليةَ من أربعِ عيِّناتٍ مجهولةٍ. استنتجْ من هذه البياناتِ أيُّ العيّناتِ محلولٌ وأيُّها معلَّقٌ أو غرويٌّ.

بياناتُ الجدولِ 1 عيّنات				
العيّنة	اللون	الصفاءُ (صافٍ أو عكر)	ترسّب	ظاهرةُ تيندال
1	أخضر	صافٍ	لا	لا
2	أزرق	عكر	نعم	لا
3	عديمُ اللونِ	صافٍ	لا	نعم
4	أبيض	عكر	لا	نعم

استنادًا إلى استدلالاتِ البياناتِ في الجدولِ 1، قرَّرْتَ أن تجريَ اختبارًا إضافيًّا على الجسيماتِ. فرشّحْتَ العيّناتِ وأعدّتَ فحصَ الرشيحِ لكلِّ عيِّنةٍ، فحصلْتَ على البياناتِ المسجَّلةِ في الجدولِ 2. استنتجِ التصنيفاتِ مستندًا إلى بياناتِ الجدولِ 2.

بياناتُ الجدولِ 2 رشاحةُ العيّناتِ				
العيّنة	اللون	الصفاءُ (صافٍ أو عكر)	ترسُّب	ظاهرةُ تيندال
1	أخضر	صافٍ	لا شيء	لا
2	أزرق	عكر	صلبٌ رماديٌّ	نعم
3	عديمُ اللونِ	عكر	لا شيء	نعم
4	عديمُ اللونِ	صافٍ	صلبٌ أبيضُ	لا

بحثٌ وكتابة

43. اكتبْ تقريرًا علميًّا في أحدِ الموضوعَيْنِ التاليَيْنِ:

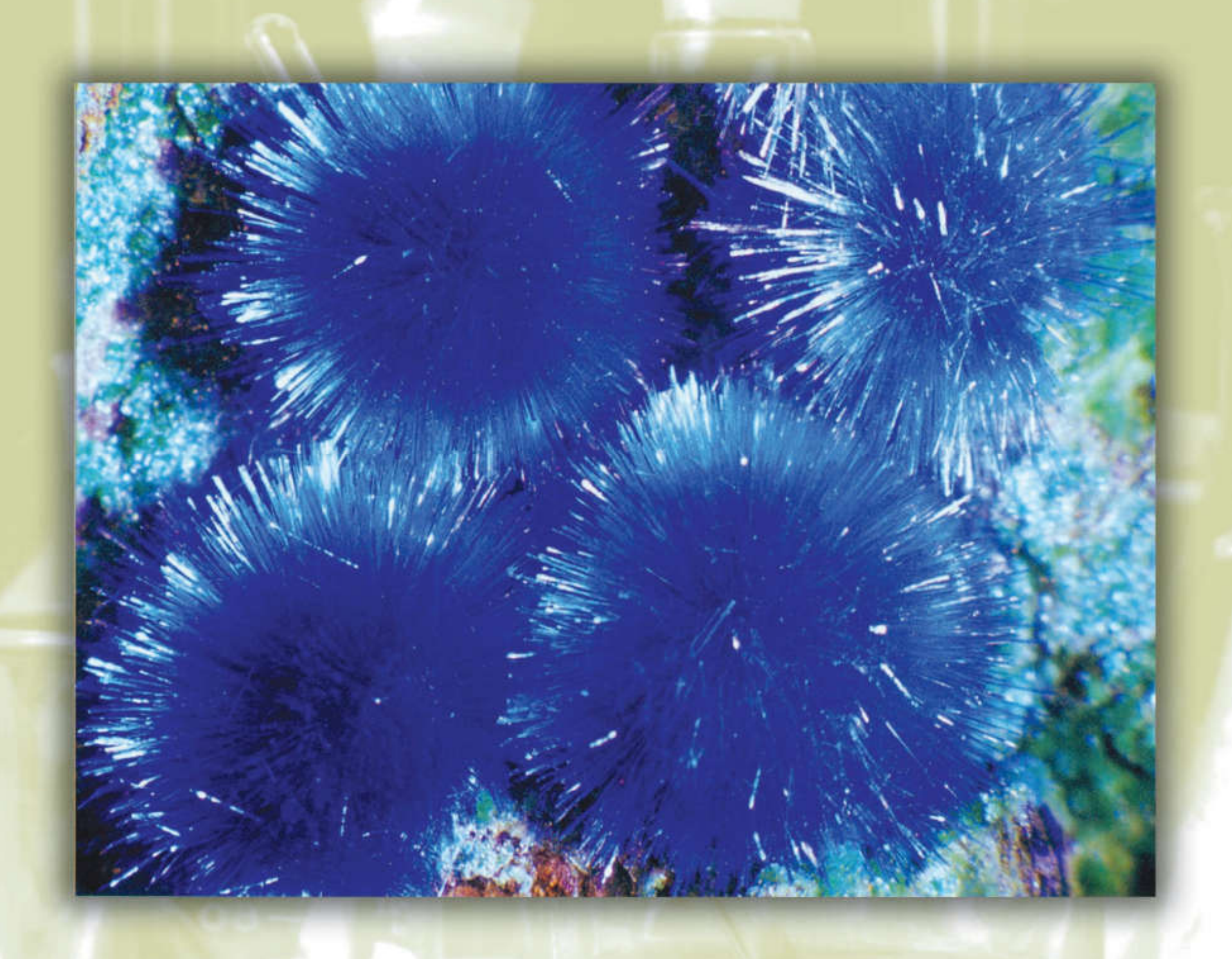
- تدخلُ الفضّةُ في صناعةِ العديدِ من السبائكِ. اكتبْ تقريرًا علميًّا عن سبائكِ الفضّةِ وأهمِّ ميزاتِها واستخداماتِها.
- مستعينًا بالجدولِ 1-2 (أصنافُ الغرويّاتِ)، اخترْ مثالاً لصنفٍ منها، واكتبْ عنه تقريرًا علميًّا توضحُ فيه كيفيَّةَ صناعتِهِ، وأهمَّ تطبيقاتِهِ الحياتيَّةِ.

تقويمٌ بديل

44. أجرِ مقارنةً بين تركيزِ الإلكتروليتِ في مختلفِ أصنافِ مشروباتِ الرياضيين. استخدمْ معلوماتِ ملصقاتِ السلعِ حولَ السكَّرِ، واحسبْ مولاريَّةَ السكَّرِ في كلِّ صنفٍ. ثم اكتبْ تقريرًا تبيِّنُ فيه نتائجَ تحليلاتِكَ لملصقاتِ السلعِ.

الفصـــل 2

الأيوناتُ في المحاليلِ المائيّةِ والخصائصُ التجمَيعيّةُ



تتشـكَّلُ هذه التكـوينـاتُ البلَّوريَّةُ من عمليَّةِ ترسيبِ مركَّباتٍ أيونيَّةٍ من محاليلَ مائيَّةٍ

القسم 1-2

المركَّباتُ في المحاليلِ المائيَّةِ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يكتبُ معادلاتٍ تمثِّلُ ذوبانَ المركَّباتِ الأيونيّةِ القابلةِ للذوبانِ في الماءِ.
- يتوقَّعُ إمكانيّةَ تكوُّنِ راسبٍ عندمَا تُمزجُ محاليلُ مركّباتٍ أيونيّةٍ قابلةٍ للذوبانِ في الماءِ، موضحًا ذلك بالمعادلاتِ الأيونيّةِ الصرفةِ لتفاعلاتِ الترسيبِ.
- يقارنُ تفكُّكَ المركَّباتِ الأيونيّةِ بتأيُّنِ المركَّباتِ الجزيئيّةِ.
- يوضحُ بالرسمِ بنيةَ أيونِ الهيدرونيوم ويفسِّرُ سببَ استعمالِهِ لتمثيلِ أيونِ الهيدروجين في المحلولِ.
- يميِّزُ بين الإلكتروليتاتِ القويّةِ والإلكتروليتاتِ الضعيفةِ.

تعلّمتَ في الصفِّ الحادي عشرَ، أن المركَّباتِ الصلبةَ يمكنُ أن تكونَ أيونيّةً أو جزيئيّةً. في الموادِّ الصلبةِ الأيونيّةِ يتكوَّنُ التركيبُ البلوريُّ من جسيماتٍ مشحونةٍ متماسكةٍ بواسطةِ قوى الجذبِ الأيونيّةِ، وهي قوًى بينيّةٌ غيرُ تساهميّةٍ. أما في الموادِّ الصلبةِ الجزيئيّةِ فتتألَّفُ الجزيئاتُ من ذرّاتٍ ترتبطُ فيما بينَها بروابطَ تساهميّةٍ. وعند ذوبانِ المادةِ الصلبةِ في الماءِ تسلكُ المركَّباتُ الأيونيّةُ سلوكًا مختلفًا عن سلوكِ المركَّباتِ الجزيئيّةِ.

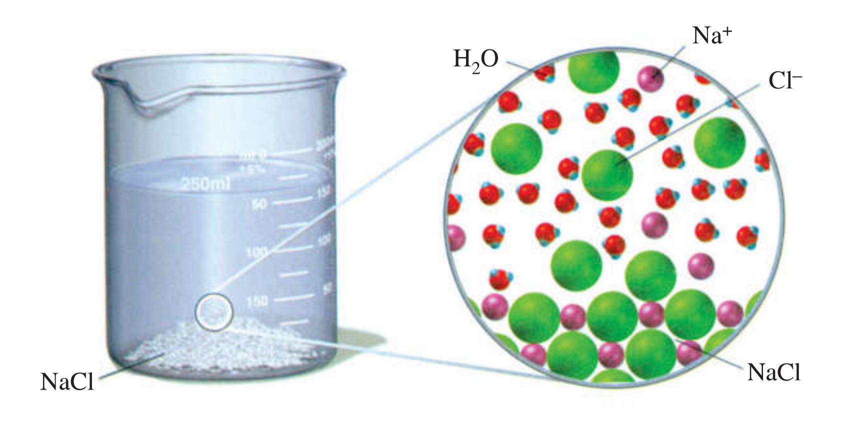
التفكُّكُ

عندمَا يذوبُ مركَّبٌ أيونيٌّ في الماءِ، تنفصلُ الأيوناتُ بعضُها عن بعضٍ، كما يظهرُ في الشكلِ 1-2 . ***وعمليةُ انفصالِ الأيوناتِ لدى ذوبانِ المركَّبِ الأيونيِّ تسمَّى التفكُّك*** **dissociation**. ومثالُ ذلك تفكُّكُ كلوريدِ الصوديوم وكلوريدِ الكالسيوم في الماءِ، وهو ما تعبِّرُ عنه المعادلتانِ التاليتان. (ترمزُ (s) إلى مادةٍ صلبةٍ، وترمزُ (aq) إلى مادةٍ في محلولٍ مائيٍّ. لاحظْ أن المعادلتَينِ موزونتانِ من حيثُ الشحنةُ وعددُ الذرّاتِ.)

$$NaCl(s) \xrightarrow{H_2O} Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$

$$CaCl_2(s) \xrightarrow{H_2O} Ca^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq)$$

لاحظْ عددَ الأيوناتِ الناتجةِ من وحدةِ الصيغةِ في كلٍّ من المعادلتَينِ السابقتَين. لعلَّكَ توصَّلْتَ إلى أن كلَّ وحدةِ صيغةِ كلوريدِ صوديومٍ تعطي أيونَينِ في المحلولِ، بينما تعطي وحدةُ صيغةِ كلوريدِ الكالسيوم ثلاثةَ أيوناتٍ في المحلولِ.



الشكل 1-2 عند ذوبانِ NaCl في الماءِ تنفصلُ الأيوناتُ بعضُها عن بعضٍ لدى مغادرتِها البلّورةَ.

إذا افترضتَ حصولَ تفكُّكٍ كاملٍ (100%)، فإن محلولاً يحتوي على 1 mol من كلوريدِ الصوديومِ سيحتوي على 1 mol من أيوناتِ الصوديوم Na^+ و 1 mol من أيوناتِ الكلوريد Cl^-. يمكنُ تمثيلُ تفكُّكِ NaCl بالمعادلةِ التالية:

$$NaCl(s) \xrightarrow{H_2O} Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$

1 mol 1 mol 1 mol

والمحلولُ الذي يحتوي على 1 mol من كلوريدِ الكالسيوم يحتوي على 1 mol من أيوناتِ الكالسيوم Ca^{2+} و 2 mol من أيوناتِ الكلوريدِ Cl^- أي ما مجموعُهُ 3 mol من الأيونات.

$$CaCl_2(s) \xrightarrow{H_2O} Ca^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq)$$

1 mol 1 mol 2 mol

مسألةٌ نموذجية 1-2

اكتبْ معادلةَ تفكُّكِ كبريتاتِ الألمنيوم $Al_2(SO_4)_3$ في الماء. كم مولاً من أيوناتِ الألمنيوم وأيوناتِ الكبريتات يَنتجُ لدى إذابةِ 1 mol من كبريتاتِ الألمنيوم؟ ما العددُ الكلّيُّ لمولاتِ الأيوناتِ الناتجةِ من إذابةِ 1 mol من كبريتاتِ الألمنيوم؟

الحلّ

1 حلِّل

المعطى: كميّةُ المذابِ = 1 mol من $Al_2(SO_4)_3$

نوعُ المذيبِ = ماء

المجهول: أ. عددُ مولاتِ أيوناتِ الألمنيومِ وأيوناتِ الكبريتات

ب. العددُ الكلّيُّ لمولاتِ أيوناتِ المذابِ الناتجة

2 خطِّط

تبيِّنُ المُعامِلاتُ في معادلةِ التفكُّكِ الموزونة، العلاقاتِ المولية. لذلك يمكنُكَ أن تستخدمَ المعادلةَ لتحدِّدَ عددَ مولاتِ أيوناتِ المذابِ الناتجة.

$$Al_2(SO_4)_3(s) \xrightarrow{H_2O} 2Al^{3+}(aq) + 3SO_4^{2-}(aq)$$

3 احسبْ

أ. $1 mol\ Al_2(SO_4)_3 \rightarrow 2\ mol\ Al^{3+} + 3\ mol\ SO_4^{2-}$

ب. $2\ mol\ Al^{3+} + 3\ mol\ SO_4^{2-} = 5\ mol$ من أيوناتِ المذابِ

4 قيِّمْ

المعادلةُ موزونةٌ بشكلٍ صحيح. وبما أن وحدةَ صيغةٍ واحدةٍ من $Al_2(SO_4)_3$ تُنتجُ 5 أيوناتٍ، فإن 1 mol من $Al_2(SO_4)_3$ يُنتجُ 5 mol من الأيوناتِ.

تمارينُ تطبيقية

1. اكتبْ معادلةَ التفكُّكِ في الماءِ لكلٍّ مما يلي، ثم حدِّدْ عددَ مولاتِ كلِّ أيونٍ يَنتجُ، بالإضافةِ إلى العددِ الكلِّيِّ لمولاتِ الأيوناتِ الناتجة.

أ. 1 mol من كلوريدِ الأمونيوم

ب. 1 mol من كبريتيدِ الصوديوم

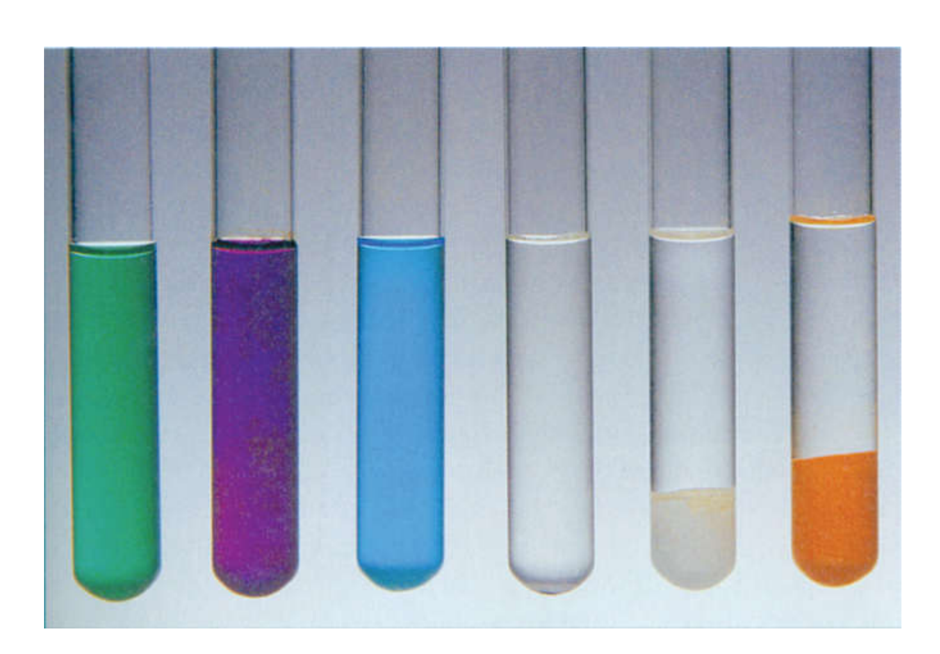
ج. 0.5 mol من نيتراتِ الباريوم

الجواب

1. أ. $NH_4Cl(s) \xrightarrow{H_2O} NH_4^+(aq) + Cl^-(aq)$، 1 mol NH_4^+، 1 mol Cl^-، 2 mol من الأيونات

ب. $Na_2S(s) \xrightarrow{H_2O} 2Na^+(aq) + S^{2-}(aq)$، 2 mol Na^+، 1 mol S^{2-}، 3 mol من الأيونات

ج. $Ba(NO_3)_2(s) \xrightarrow{H_2O} Ba^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq)$، 0.5 mol Ba^{2+}، 1 mol NO_3^-، 1.5 mol من الأيونات



الشكل 2-2 المركَّباتُ الأيونيةُ يمكنُ أن تكونَ قابلةً أو غيرَ قابلةٍ للذوبانِ في الماءِ. فمثلاً المركّباتُ $NiCl_2$، $KMnO_4$ و $CuSO_4$ و $Pb(NO_3)_2$ هي مركَّباتٌ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ، في حينِ أن المركَّبينِ $AgCl$ و CdS غيرُ قابلَينِ للذوبانِ في الماءِ.

تفاعلاتُ الترسيبِ

لا توجدُ مادَّةٌ غيرُ قابلةٍ للذوبانِ كليًّا، وعلى الرغمِ من ذلك يمكنُ اعتبارُ المركَّباتِ ذاتِ الذوبانيّةِ المتدنيّةِ غيرَ قابلةٍ للذوبان. يُظهرُ الشكل 2-2 أمثلةً على مركَّباتٍ أيونيةٍ قابلةٍ للذوبانِ في الماءِ، وأخرى غيرِ قابلةٍ للذوبانِ في الماءِ. ومن الصعبِ اعتمادُ شروطٍ للذوبانيّةِ تغطي الحالاتِ كافّةً، لكن يمكنُ اعتمادُ قواعدَ عامّةٍ تساعدُ على توقُّعِ أن يكونَ مركّبٌ مكوّنٌ من أيوناتٍ معيّنةٍ قابلاً للذوبانِ في الماء. يوضحُ الجدولُ 2-1 هذه القواعدَ.

من معاينةِ الجدولِ يمكنُكَ الاستنتاجُ أن معظمَ مركَّباتِ الصوديومِ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ. فمثلاً كربوناتُ الصوديومِ، Na_2CO_3، قابلةٌ للذوبانِ لاحتوائِها على الصوديومِ، وهي تتفكّكُ وفقًا للمعادلةِ التالية:

$$Na_2CO_3(s) \xrightarrow{H_2O} 2Na^+(aq) + CO_3^{2-}(aq)$$

الجدول 1-2 قواعدُ عامّةٌ للذوبانيّةِ

1. مركّباتُ الصوديومِ والبوتاسيومِ والأمونيومِ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ.
2. النيتراتُ والأسيتاتُ والكلوراتُ قابلةٌ للذوبانِ.
3. معظمُ الكلوريداتِ قابلةٌ للذوبانِ، عدا كلوريداتِ الفضّةِ والزئبقِ (I) والرصاصِ. كلوريدُ الرصاصِ (II) قابلٌ للذوبانِ في الماءِ الساخنِ.
4. معظمُ الكبريتاتِ قابلةٌ للذوبانِ، تُستثنى كبريتاتُ الباريومِ والسترونشيومِ والرصاص والكالسيومِ والزئبقِ.
5. معظمُ الكربوناتِ والفوسفاتِ والسليكاتِ غيرُ قابلةٍ للذوبانِ، تُستثنى مركّباتُ الصوديومِ والبوتاسيومِ والأمونيوم.
6. معظمُ الكبريتيداتِ غيرُ قابلةٍ للذوبانِ، تُستثنى مركّباتُ الكالسيومِ والسترونشيومِ والصوديومِ والبوتاسيومِ والأمونيومِ.

هل فوسفاتُ الكالسيوم $Ca_3(PO_4)_2$ قابلٌ للذوبانِ في الماءِ أم لا؟ وفقًا للجدول 2-1 معظمُ الفوسفاتِ غيرُ قابلٍ للذوبانِ. بما أن فوسفاتَ الكالسيومِ ليسَ استثناءً للقاعدةِ فإنه غيرُ قابلٍ للذوبانِ، وبالتالي لا يمكنُ كتابةُ معادلةِ التفكُّكِ للمركَّباتِ غيرِ القابلةِ الذوبانِ.

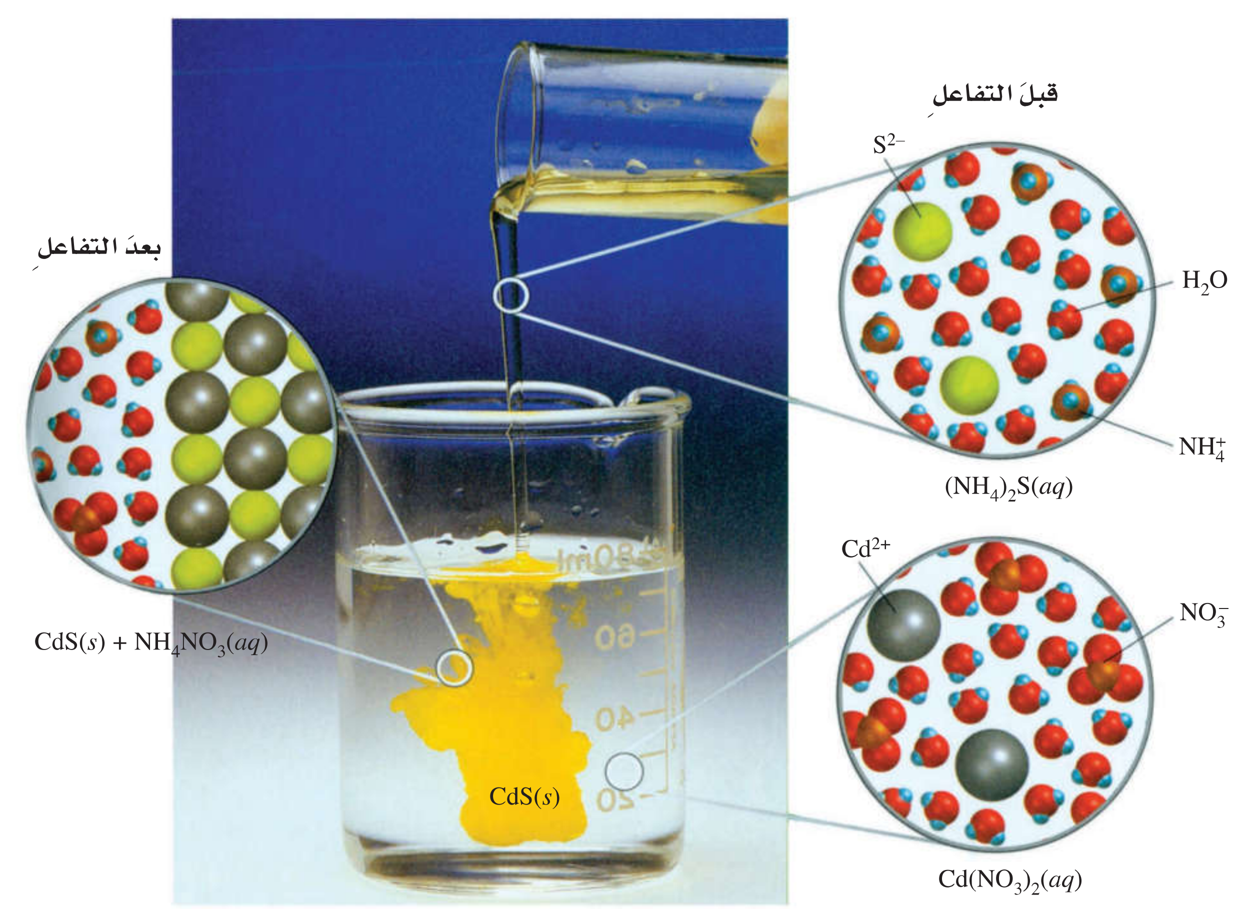
المعلوماتُ الواردةُ في الجدولِ 2-1 مفيدةٌ أيضًا في توقُّعِ ما يحصلُ عندَ خلطِ محلولَينِ لمركَّبَينِ مختلفَينِ قابلَينِ للذوبانِ. فإذا نتجَ عن عمليّةِ الخلطِ مجموعاتٌ أيونيّةٌ تكوِّنُ مركَّبًا غيرَ قابلٍ للذوبانِ، يُتوقَّعُ حدوثُ تفاعلِ استبدالٍ ثنائيٍّ وترسيبٍ. يحصلُ الترسيبُ عندَما تكونُ قوى الجذبِ بين الأيوناتِ أكبرَ من قوى الجذبِ بين الأيوناتِ وجزيئاتِ الماءِ المحيطةِ بها.

هل يتكوَّنُ راسبٌ عندَ مزجِ محلولَي كبريتيدِ الأمونيومِ ونيتراتِ الكادميومِ؟ باستخدامِ الجدولِ 2-1 يمكنُكَ الاستنتاجُ أن نيتراتَ الكادميومِ $Cd(NO_3)_2$، قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ، لأنها نيتراتٌ، وجميعُ أملاحِ النيتراتِ قابلةٌ للذوبانِ. ويمكنُكَ الاستنتاجُ أيضًا أن كبريتيدَ الأمونيومِ $(NH_4)_2S$ هو الآخرُ قابلٌ للذوبان، وهو أحدُ الكبريتيدات القابلةِ للذوبانِ والمسجَّلةِ في الجدولِ، وتكونُ معادلتا التفكُّكِ كالتالي:

$$(NH_4)_2S(s) \xrightarrow{H_2O} 2NH_4^+(aq) + S^{2-}(aq)$$

$$Cd(NO_3)_2(s) \xrightarrow{H_2O} Cd^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq)$$

الشكل 3-2 كبريتيدُ الأمونيومِ مركَّبٌ قابلٌ للذوبانِ، يتفكَّكُ في الماءِ لتكوينِ أيوناتِ NH_4^+ و S^{2-}. ونيتراتُ الكادميومِ مركَّبٌ قابلٌ للذوبانِ هو الآخرُ، ويتفكَّكُ في الماءِ لتكوينِ أيوناتِ NO_3^- و Cd^{2+}. ويترسَّبُ كبريتيدُ الكادميومِ عندَما يتمُّ مزجُ المحلولَين.



الناتجانِ المحتملانِ لتفاعلِ الاستبدالِ الثنائيِّ بينَ $(NH_4)_2S$ و $Cd(NO_3)_2$ هما نيتراتُ الأمونيومِ NH_4NO_3، وكبريتيدُ الكادميومِ CdS. وعلاماتُ الاستفهامِ في المعادلةِ تُظهرُ أن حالةَ المادةِ غيرُ معروفةٍ.

$$(NH_4)_2S(aq) + Cd(NO_3)_2(aq) \rightarrow 2NH_4NO_3(?) + CdS(?)$$

لكي تقرِّرَ أيتكوّنُ راسبٌ أم لا، يجبُ أن تعرفَ قابليَّةَ ذوبانِ هذيْنِ المركَّبَين. عند مراجعةِ الجدولِ 2-1 يمكنُك أن تلاحظَ أن المركَّبَ NH_4NO_3 قابلٌ للذوبانِ في الماءِ، في حينِ أن المركَّبَ CdS غيرُ قابلٍ للذوبانِ. وبذلك يمكنُكَ أن تتوقَّعَ، لدى مزجِ محلولَيْ كبريتيدِ الأمونيومِ ونيتراتِ الكادميومِ، عدمَ ترسُّبِ نيتراتِ الأمونيومِ وترسُّبَ كبريتيدِ الكادميومِ. تتكوّنُ حبيبات CdS عندما يمتزج المحلولان، كما يظهر في الشكل 2-3. في المعادلةِ التاليةِ يُظهر الرمزانِ (aq) و (s) أن نيتراتَ الأمونيومِ تبقى في المحلولِ، وأن كبتريتيدَ الكادميومِ يترسَّبُ.

$$(NH_4)_2S(aq) + Cd(NO_3)_2(aq) \rightarrow 2NH_4NO_3(aq) + CdS(s)$$

المعادلاتُ الأيونيَّةُ الصرفةُ

تُمثَّلُ تفاعلاتُ الأيوناتِ في المحاليلِ المائيَّةِ، عادةً، بالمعادلاتِ الأيونيَّةِ الصرفةِ بدلاً من المعادلاتِ بالصيغ. ***وتتضمَّنُ المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ* net ionic equation *فقط المركَّباتِ والأيوناتِ التي تتعرَّضُ لتغيُّرٍ كيميائيٍّ عند حدوثِ تفاعلاتٍ في محاليلَ مائيَّةٍ.*** ولكتابةِ معادلةٍ أيونيَّةٍ صرفةٍ يجبُ أولاً تحويلُ المعادلةِ الكيميائيَّةِ إلى معادلةٍ أيونيَّةٍ عامّةٍ، مع توضيحِ كافَّةِ المركَّباتِ الأيونيَّةِ القابلةِ للذوبانِ، كأيوناتٍ متفكِّكةٍ في المحلولِ، وتوضيحِ الرواسبِ كموادَّ صلبةٍ. ويمكنُ توضيحُ عمليَّةِ ترسيبِ كبريتيدِ الكادميومِ الذي تمَّ وصفُهُ سابقًا، بالمعادلةِ الأيونيَّةِ العامَّةِ التاليةِ:

$$Cd^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2NH_4^+(aq) + S^{2-}(aq) \rightarrow$$
$$CdS(s) + 2NO_3^-(aq) + 2NH_4^+(aq)$$

لاحظْ أن أيونَيِ الأمونيومِ والنيتراتِ يظهرانِ كلاهما على طرفَيِ المعادلةِ. وهذا يعني أنهما لم يتعرَّضا لأيِّ تغيُّرٍ كيميائيٍّ، وأنهما بقيا على حالتَيْهما الأصليتَين. ***تسمَّى الأيوناتُ التي لا تدخلُ في أيِّ تفاعلٍ كيميائيٍّ وتبقى في المحلولِ قبلَ عمليةِ التفاعلِ وبعدَها بالأيوناتِ المتفرِّجةِ* spectator ions.**

لتحويلِ معادلةٍ أيونيَّةٍ إلى معادلةٍ أيونيَّةٍ صرفةٍ، تحذفُ الأيوناتُ المتفرِّجةُ من طرفَيِ المعادلةِ. إن حذفَ الأيونَينِ NH_4^+ و NO_3^- من المعادلةِ الأيونيَّةِ العامَّةِ السابقةِ، يعطي المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ التاليةَ:

$$Cd^{2+}(aq) + S^{2-}(aq) \rightarrow CdS(s)$$

هذه المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ لا تطبَّقُ فقط على التفاعلِ بين $(NH_4)_2S$ و $Cd(NO_3)_2$ بل تطبَّقُ أيضًا على أيِّ تفاعلٍ يتكوَّنُ فيه الراسبُ كبريتيدُ الكادميومِ، عندما تتَّحدُ الأيوناتُ في المحلولِ. فعلى سبيلِ المثالِ، تعبِّرُ المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ السابقةُ عن ترسُّبِ CdS عندَ تفاعلِ $CdSO_4$ و H_2S.

مسألةٌ نموذجية 2-2

حدِّدِ الراسبَ الذي يتكوَّنُ عند مزجِ محلولَيْ نيتراتِ الخارصينِ وكبريتيدِ الأمونيوم. اكتبْ معادلةَ الاستبدالِ الثنائيِّ المحتملةُ، ثم اكتبِ المعادلةَ بالصيغِ والمعادلةَ الأيونيَّةَ العامّةَ والمعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ للتفاعل.

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: هويةُ المتفاعلاتِ: نيتراتُ الخارصينِ وكبريتيدُ الأمونيومِ

وسطُ التفاعلِ: محلولٌ مائيٌّ

المجهول: أ. معادلةُ تفاعلِ الاستبدالِ الثنائيِّ المحتملِ

ب. هويةُ الراسبِ

ج. المعادلةُ بالصيغِ

د. المعادلةُ الأيونيَّةُ العامةُ

هـ. المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ

2 خطِّطْ

اكتبْ تفاعلَ الاستبدالِ الثنائيِّ المحتملَ حدوثُه بين $Zn(NO_3)_2$ و $(NH_4)_2S$. استعنْ بالجدولِ 2-1، لتحديدِ الناتجِ الذي يكونُ غيرَ قابلٍ للذوبانِ في الماءِ ويترسَّبُ. اكتبِ المعادلةَ بالصيغِ والمعادلةَ الأيونيَّةَ العامَّةَ ثم احذفِ الأيوناتِ المتفرِّجةَ للحصولِ على المعادلةِ الأيونيَّةِ الصرفةِ.

3 احسبْ

أ. تكونُ معادلةُ تفاعلِ الاستبدالِ الثنائيِّ كالتالي:

$$Zn(NO_3)_2(aq) + (NH_4)_2S(aq) \rightarrow ZnS(?) + 2NH_4NO_3(?)$$

ب. يبيِّنُ الجدولُ 2-1 أن كبريتيدَ الخارصينِ غيرُ قابلٍ للذوبانِ، وبذلك سيترسَّبُ في المحلولِ، وإن نيتراتَ الأمونيومِ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ.

ج. تكونُ المعادلةُ بالصيغِ كالتالي:

$$Zn(NO_3)_2(aq) + (NH_4)_2S(aq) \rightarrow ZnS(s) + 2NH_4NO_3(aq)$$

د. تكونُ المعادلةُ الأيونيَّةُ العامَّةُ كالتالي:

$$Zn^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq) + 2NH_4^+(aq) + S^{2-}(aq) \rightarrow ZnS(s) + 2NH_4^+(aq) + 2NO_3^-(aq)$$

هـ. تظهرُ أيوناتُ الأمونيومِ والنيتراتِ في طرفَيِ المعادلةِ كأيوناتٍ متفرِّجةٍ، وبذلك تصبحُ المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ كالتالي:

$$Zn^{2+}(aq) + S^{2-}(aq) \rightarrow ZnS(s)$$

تمارينُ تطبيقية

1. هل يتكوَّنُ راسبٌ عند مزجِ محلولَيْ كبريتاتِ البوتاسيومِ ونيتراتِ الباريوم؟ إذا أجبتَ بـ «نعم»، اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ للتفاعل.
2. هل يتكوَّنُ راسبٌ عند مزجِ محلولَيْ نيتراتِ البوتاسيومِ وكبريتاتِ المغنيسيوم؟ إذا أجبتَ بـ «نعم»، اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ للتفاعل.
3. هل يتكوَّنُ راسبٌ عند مزجِ محلولَيْ كلوريدِ الباريومِ وكبريتاتِ الصوديوم؟ إذا أجبتَ بـ «نعم»، حددِ الأيوناتِ المتفرِّجةَ ثم اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ.
4. اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ لترسُّبِ كبريتيدِ النيكل (II).

الجواب

1. نعم، $Ba^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow BaSO_4(s)$
2. كلا
3. نعم، Na^+ و Cl^-، $Ba^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow BaSO_4(s)$
4. $Ni^{2+}(aq) + S^{2-}(aq) \rightarrow NiS(s)$

التأيُّنُ

بعضُ المركَّباتِ الجزيئيَّةِ تكوِّنُ أيوناتٍ في المحاليل، وتكونُ عادةً هذه المركَّباتُ قطبيَّةً. ***وعملية تكوُّنِ الأيونات من جزيئاتِ المذابِ نتيجةَ لفعلِ المذيبِ تسمَّى التأيُّنَ* ionization**. ولهذه المفردةِ معنًى آخرُ أكثرُ شموليَّةً، هو عمليَّةُ تكوينِ أيوناتٍ عندما لا تكونُ الأيوناتُ موجودةً أصلاً. لاحظْ أن عمليةَ التأيُّنِ تختلفُ عن عمليَّةِ التفكُّكِ. فعندما يذوبُ مركَّبٌ أيونيٌّ تنفصلُ الأيوناتُ المترابطةُ. وعند ذوبانِ مركّبٍ جزيئيٍّ نجدُهُ يتأيَّنُ في المذيبِ القطبيِّ (الماء مثلاً) وتتكوَّنُ الأيوناتُ التي لم تكنْ موجودةً في المركَّبِ غيرِ الذائبِ. وكبقيَّةِ الأيوناتِ الموجودةِ في محلولٍ مائيٍّ، فإن الأيوناتِ المتكوِّنةَ من مذابٍ جزيئيٍّ تكونُ مميّأةً. وتكونُ الطاقةُ المنطلقةُ كحرارةٍ خلالَ عمليةِ تميُّؤِ الأيوناتِ مصدرًا للطاقةِ اللازمةِ لتكسيرِ الروابطِ التساهميَّةِ.

وبصورةٍ عامَّةٍ، يعتمدُ مدى تأيُّنِ مذابٍ في محلولٍ معيَّنٍ على قوَّةِ الروابطِ داخلَ جزيئاتِ المذابِ وعلى قوَّةِ التجاذبِ بين جزيئاتِ المذابِ والمذيبِ. فإذا كانتْ قوَّةُ الرابطةِ داخلَ جزيءِ المذابِ أقلَّ من قوى التجاذبِ بين جزيئاتِ المذيبِ والمذابِ تنكسرُ الرابطةُ التساهميَّةُ في المذابِ وينفصلُ الجزيءُ إلى أيوناتٍ. فمثلاً كلوريدُ الهيدروجين HCl، وهو مركَّبٌ جزيئيٌّ يحتوي على رابطةٍ تساهميَّةٍ ذاتِ قطبيَّةٍ عاليةٍ، يتأيَّنُ في المحلولِ المائيِّ لأن قوى التجاذبِ بين جزيءِ HCl القطبيِّ وبين جزيئاتِ الماءِ القطبيَّةِ تكونُ كافيةً لكسرِ رابطةِ HCl وتكوينِ أيوناتِ الهيدروجينِ وأيوناتِ الكلوريدِ.

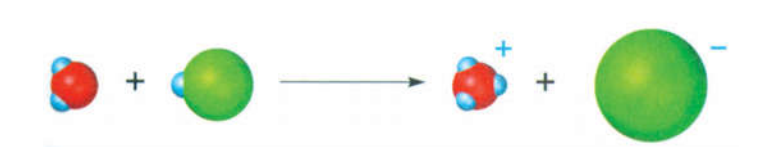
$$HCl(g) \xrightarrow{H_2O} H^+(aq) + Cl^-(aq)$$

أيونُ الهيدرونيوم

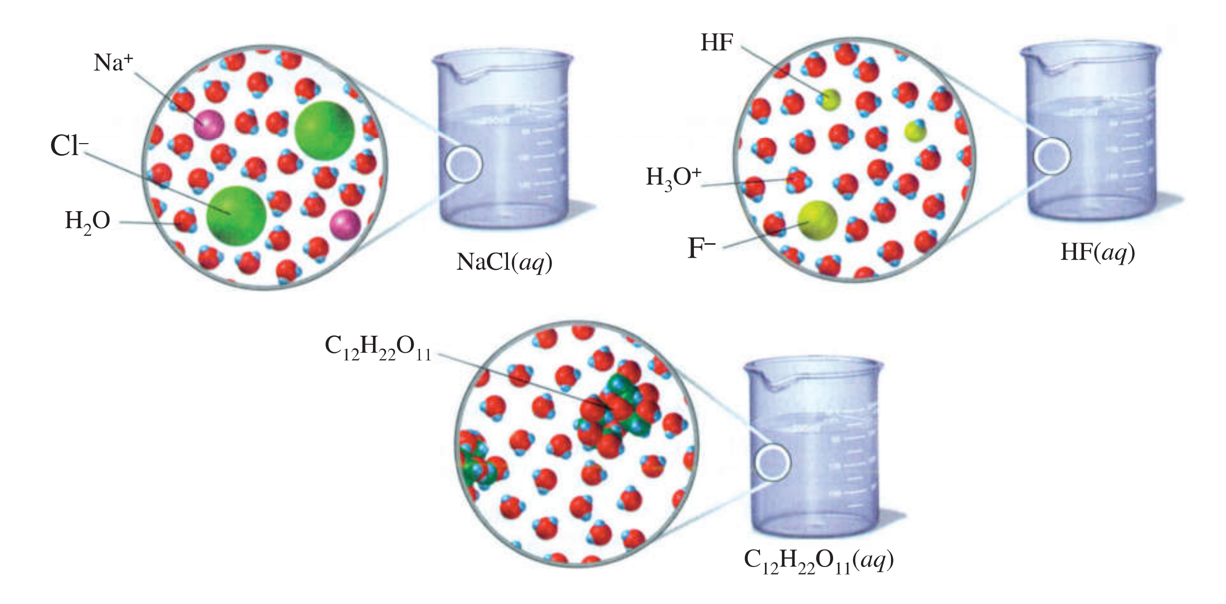
يحتوي عددٌ كبيرٌ من المركّباتِ الجزيئيَّةِ على ذرَّةِ هيدروجينٍ مرتبطةٍ برابطةٍ تساهميَّةٍ قطبيَّةٍ. وتتأينُ بعضُ هذه المركَّباتِ في المحلولِ المائيِّ لإنتاجِ أيونِ H^+. بدورِهِ يجذبُ أيونُ H^+ جزيئاتٍ أو أيوناتٍ أخرى بقوةٍ تبلغُ درجةً لا يتمكَّنُ معها، عادةً، من البقاءِ وحدَه. إن تأيُّنَ كلوريدِ الهيدروجين في الماءِ يمكنُ توصيفُهُ كتفاعلٍ كيميائيٍّ يتمُّ فيه انتقالُ بروتونٍ بصورةٍ مباشرةٍ من جزيءِ HCl إلى جزيءِ ماءٍ، حيث يصبحُ البروتون مرتبطًا تساهميًّا مع ذرَّةِ الأكسجينِ لتكوينِ H_3O^+.

$$H_2O(l) + HCl(g) \rightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

يمثِّلُ الشكلُ 2-4 هذه العمليَّةَ. ***وأيونُ H_3O^+ يعرفُ باسمِ أيونِ الهيدرونيوم* hydronium ion**. إن تفاعلَ أيونِ H^+ لتكوينِ أيونِ الهيدرونيوم ينتجُ معظمَ الطاقةِ اللازمةِ لتأيينِ مذابٍ جزيئيٍّ.



الشكل 2-4 عندما يذوبُ غازُ كلوريدِ الهيدروجينِ في الماءِ، يتأيَّنُ ليكوِّنَ أيونَ H^+ وأيونَ Cl^-. يرتبطُ أيونُ H^+ مباشرةً بجزيءِ ماءٍ ليكوِّنَ أيونَ الهيدرونيوم. يُعرفُ المحلولُ المائيُّ لكلوريدِ الهيدروجينِ باسمِ حمضِ الهيدروكلوريك.



الشكل 5-2 تُنتِجُ الإلكتروليتاتُ القويَّةُ، مثلُ NaCl، أيوناتٍ فقط عند إذابتِها في محلولِها المائي.
الإلكتروليتاتُ الضعيفةُ، مثلُ HF، توجدُ في المحلولِ المائيِّ كأيوناتٍ وجزيئاتٍ غيرِ متأيِّنةٍ. الموادُّ اللاإلكتروليتيَّةُ، كالسكروز $C_{12}H_{22}O_{11}$، لا تكوِّنُ أيَّ أيوناتٍ في المحاليلِ المائيَّةِ.

الإلكتروليتاتُ القويَّةُ والضعيفةُ

تعلَّمتَ في الفصلِ الأوَّلِ من هذا الكتاب، أن الموادَّ التي تنتجُ أيوناتٍ وتوصِّلُ التيارَ الكهربائيَّ عند وضعِها في محلولِها المائي هي موادُّ إلكتروليتيَّةٌ، وأن الموادَّ التي لا تنتجُ أيوناتٍ ولا توصِّلُ التيارَ الكهربائيَّ عند وضعِها في المحلولِ المائيِّ هي موادُّ لاإلكتروليتيَّةٌ. وكلوريدُ الهيدروجينِ هو مركَّبٌ من سلسلةٍ من المركَّباتِ التي تحتوي على الهيدروجينِ وعلى عنصرٍ ينتمي إلى المجموعةِ 17 (المسمّاةِ هالوجينات). جميعُ هاليداتِ الهيدروجينِ مركَّباتٌ جزيئيَّةٌ تحتوي على رابطةٍ تساهميَّةٍ قطبيَّةٍ واحدةٍ. وجميعُها غازاتٌ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ بدرجةٍ كبيرةٍ، وذاتُ طبيعةٍ إلكتروليتيَّةٍ. فالمحاليلُ المائيَّةُ لكلٍّ من كلوريدِ الهيدروجينِ وبروميدِ الهيدروجينِ ويوديدِ الهيدروجينِ موصِّلةٌ جيدةٌ للتيارِ الكهربائيِّ. أما فلوريدُ الهيدروجينِ ذو التركيزِ نفسِه فموصِّلٌ ضعيفٌ للتيارِ الكهربائيِّ. إن قدرةَ الموادِّ على توصيلِ التيارِ الكهربائيِّ مرتبطةٌ بقدرتِها على تكوينِ أيوناتٍ في محاليلِها، كما يظهرُ في الشكل 5-2.

الإلكتروليتاتُ القويَّةُ

يتأيَّنُ كلٌّ من كلوريدِ الهيدروجينِ وبروميدِ الهيدروجينِ ويوديدِ الهيدروجينِ بشكلٍ تامٍّ (100%) في المحاليلِ المائيَّةِ المخفَّفةِ. **الإلكتروليتُ القويُّ strong electrolyte** هو ***المركَّبُ الذي يوصِّلُ محلولُهُ المائيُّ المخفَّفُ التيَّارَ الكهربائيَّ بصورةٍ جيدةٍ. والسببُ في ذلك هو أن جميعَ أو معظمَ جسيماتِ المركَّبِ الذائبةِ موجودةٌ بشكلِ أيوناتٍ.*** كلوريدُ الهيدروجينِ وبروميدُ الهيدروجينِ ويوديدُ الهيدروجينِ هي أحماضٌ في محاليلِها المائيَّةِ. هذه الأحماضُ وأحماضٌ أخرى غيرُها وجميعُ المركَّباتِ الأيونيَّةِ القابلةِ للذوبانِ، هي إلكتروليتاتٌ قويَّةٌ.

الصفةُ المميِّزةُ للإلكتروليتاتِ القويَّةِ هي أنها، مهما كانت درجةُ ذوبانِها في الماءِ، لا تنتجُ إلا أيوناتٍ. بعضُ الإلكتروليتاتِ القويَّةِ، مثلِ NaCl، هي ذاتُ ذوبانيَّةٍ عاليةٍ في الماءِ وتكوِّنُ أيوناتٍ في المحلولِ، في حينِ أن بعضَها الآخرَ ليس له درجةُ الذوبانيَّةِ نفسُها. وما يذوبُ منه يبقى في المحلولِ على شكلِ أيوناتٍ فقط.

الإلكتروليتاتُ الضعيفةُ

تكوّنُ بعضُ المركَّباتِ الجزيئيَّةِ محاليلَ مائيَّةً لا تحتوي على أيوناتٍ ذائبةٍ فحسبُ، بل تحتوي أيضًا على جزيئاتٍ ذائبةٍ غيرِ متأيِّنةٍ. ففلوريدُ الهيدروجينِ HF يذوبُ في الماءِ ليعطيَ محلولاً حمضيًّا يسمّى حمضَ الهيدروفلوريك. إن الرابطةَ بين الهيدروجينِ والفلورِ أقوى من الرابطةِ بين الهيدروجينِ وبقيةِ الهالوجينات. وعندما يذوبُ فلوريدُ الهيدروجينِ تتأيَّنُ بعضُ الجزيئاتِ، لكنَّ التفاعلَ العكسيَّ الذي تتحدُ خلالَه أيوناتُ H^+ مع أيوناتِ F^- لتكوينِ جزيئاتِ فلوريدِ الهيدروجينِ، يحدثُ أيضًا.

$$HF(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + F^-(aq)$$

لذلك يبقى تركيزُ HF المذاب أكبرَ بكثيرٍ من تركيزِ الأيونَين H_3O^+ و F^-.

إن فلوريدَ الهيدروجينِ هو مثالٌ على الإلكتروليتِ الضعيفِ. **الإلكتروليتُ الضعيفُ weak electrolyte** ***هو كلُّ مركَّبٍ يوصِّلُ محلولُهُ المائيُّ المخفَّفُ التيارَ الكهربائيَّ بشكلٍ ضعيفٍ، وذلك لوجودِ كميَّةٍ قليلةٍ من المركَّبِ الذائبِ بشكلِ أيوناتٍ.*** وفي المقابلِ يذوبُ اللاإلكتروليتُ، كالمركَّبِ الجزيئيِّ، السكروزِ، من دونِ إنتاجِ أيِّ أيوناتٍ في المحلولِ. ويوجدُ مثالٌ آخرُ على الإلكتروليتاتِ الضعيفةِ، هو حمضُ الأسيتيكِ CH_3COOH (الخل) الذي لا يتأيَّنُ منه في المحلولِ سوى نسبةٍ مئويةٍ صغيرةٍ.

$$CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$$

يتوجَّبُ عدمُ الخلطِ بين وصفِ الإلكتروليتِ بالقويِّ أو الضعيفِ وبين وصفِ المحلولِ بالمركَّزِ أو المخفَّفِ. تختلفُ الإلكتروليتاتُ القويَّةُ عن الضعيفةِ تبعًا لنسبةِ تأيُّنِها أو تفكُّكِها. لكن المحاليلَ المركَّزةَ تختلفُ عن المخفَّفةِ تبعًا لكميَّةِ المذابِ في كميَّةٍ معيَّنةٍ من المذيبِ. فحمضُ الهيدروكلوريكِ هو إلكتروليتٌ قويٌّ دائمًا، يصحُّ هذا مع أيِّ تركيزٍ له، حتى وإن كان 0.00001 M، أي مخفَّفًا جدًّا. بينما يعدُّ حمضُ الأسيتيك، في المقابلِ، إلكتروليتًا ضعيفًا دائمًا، حتى وإن حُضِّرَ بتركيزِ 10 M، أي كمحلولٍ عالي التركيزِ.

مراجعةُ القسم 1-2

1. اكتبْ معادلةَ تفكُّكِ $Sr(NO_3)_2$ في الماءِ. كم مولاً من أيوناتِ السترونشيومِ وأيوناتِ النيتراتِ تتكوَّنُ عند إذابةِ 0.5 mol من نيتراتِ السترونشيوم؟
2. هل يتكوَّنُ راسبٌ عند مزجِ محلولِ أسيتاتِ المغنيسيوم مع محلولِ كلوريدِ السترونشيوم؟
3. ما الذي يحدِّدُ إمكانيَّةَ تأيُّنِ مركَّبٍ جزيئيٍّ في محلولٍ قطبيٍّ؟
4. فسِّرْ لماذا HCl إلكتروليتٌ قويّ و HF إلكتروليتٌ ضعيفٌ.

تفكيرٌ ناقد

5. **توقُّعُ نتائج:** أيٌّ من أزواجِ المحاليلِ التاليةِ يحتوي على أكبرِ تركيزٍ للأيونات؟
   - أ. 0.10 M HCl و 0.05 M HCl
   - ب. 0.10 M HCl و 0.10 M HF
   - ج. 0.10 M HCl و 0.10 M $CaCl_2$

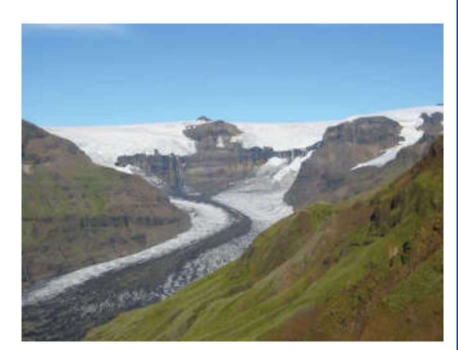
الماءُ وألوانُ الجبالِ

عن أ.د. كارم السيد غنيم، أستاذ بكليّة العلوم، جامعة الأزهر، القاهرة.

قد يستغربُ القارئُ عندَ الحديثِ عن دورِ الماءِ في سقيِ النباتاتِ المختلفةِ التي بدورِها تعطي ثمارًا مختلفةَ الأشكالِ والألوانِ. لكنَّ الغرابةَ تظهرُ من الربطِ بين الماءِ ولونِ الصخورِ والجبالِ، إذ يقولُ اللهُ تباركَ وتعالى:

﴿أَلَمْ تَرَ أَنَّ ٱللَّهَ أَنزَلَ مِنَ ٱلسَّمَآءِ مَآءً فَأَخْرَجْنَا بِهِۦ ثَمَرَٰتٍ مُّخْتَلِفًا أَلْوَٰنُهَا ۚ وَمِنَ ٱلْجِبَالِ جُدَدٌۢ بِيضٌ وَحُمْرٌ مُّخْتَلِفٌ أَلْوَٰنُهَا وَغَرَابِيبُ سُودٌ ﴿٢٧﴾﴾

(سورةُ فاطر: الآية 27). لما كانَ الماءُ أكثرَ السوائلِ انتشارًا (وخصوصًا بين السوائلِ ذاتِ الكثافةِ المنخفضةِ)، وأكثرَ السوائلِ مقدرةً على الإذابةِ، إذ يقومُ الماءُ بإذابةِ الكثيرِ من المركَّباتِ الكيميائيَّةِ الأيونيَّةِ للفلزّاتِ الانتقاليَّةِ ذاتِ الألوانِ المختلفةِ. وبحكمِ خاصّيَّةِ الجريانِ والحركةِ للماءِ كسائلٍ، فإنَّ الماءَ يتميَّزُ بقدرةٍ عاليةٍ على الحركةِ بهذه الأيوناتِ، وبالتالي على نقلِها إلى أماكنَ بعيدةٍ. ويُعدُّ الماءُ أفضلَ الأوساطِ لحدوثِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ، حيث تتفاعلُ أيوناتُ



عناصرَ مثلِ الحديدِ والمنجنيزِ الذائبَيْنِ في الماءِ مع بعضِ الأنيوناتِ الذائبةِ، مثلِ الهيدروكسيدِ والسيليكاتِ والكربوناتِ، ويعادُ توزيعُها على أسطحِ الحبيباتِ والبلوراتِ، ومن ثَمَّ تصطبغُ هذه الحبيباتُ والبلَّوراتُ بألوانٍ حمراءَ، أو بنّيَّةٍ أو بنفسجيَّةٍ أو غيرِها من الألوانِ. وتحدثُ في المناطقِ الغزيرةِ الأمطارِ عمليّاتُ غسلِ الماءِ لهذه المعادنِ، فتتبقى منها رواسبُ مثلُ الهيدروكسيداتِ والسيليكاتِ لعناصرَ مثلِ المنجنيزِ والحديدِ والنيكلِ ذاتِ الألوانِ المميَّزةِ.

فمثلاً الجبالُ الحمراءُ التي وردَ ذكرُها في الآيةِ الكريمةِ، «حمرٌ مختلفٌ ألوانُها»، يفسِّرُ المتخصصونَ ألوانَها بشيوعِ عنصرِ الحديدِ فيها، وهو الذي يتأكسدُ، فيظهرُ الصخرُ بلونٍ أحمرَ. ويصاحبُ الحديدُ معادنَ فلزِّيَّةً أخرى كالنحاسِ والرصاصِ، وتختلفُ نسبُ وجودِها. وبالتالي فاللونُ الأحمرُ ذو درجاتٍ، وليس أحمرَ قانيًا أو محضًا. تظهرُ ألوانُ الصخورِ (ومن ثَمَّ ألوانُ الجبالِ) نتيجةً لألوانِ المعادنِ الموجودةِ فيها. ويتوقَّفُ لونُ المعدنِ على التركيبِ الكيميائيِّ له وظروفِ البيئةِ التي يتكوَّنُ فيها، إن كانتْ مؤكسدةً أو غيرَ ذلك. وتتغيَّرُ ألوانُ المعادنِ بامتصاصِها لكمِّيَّةٍ من الطاقةِ أو الموجاتِ الضوئيَّةِ. وأشدُّ المعادنِ تأثُّرًا بذلك المعادنُ المحتويةُ على فلزّاتٍ انتقاليَّةٍ، مثلِ الحديدِ والكرومِ والمنجنيزِ، التي تتغيَّرُ ألوانُها بظاهرةِ الامتصاصِ، في ما يسمّى «نظريةَ المجالِ البلّوريِّ»
crystal field theory.

وأما دورُ الماءِ في تغييرِ ألوانِ الصخورِ (ومن ثَمَّ ألوانِ الجبالِ) عن طريقِ تدخُّلِه في عمليّاتِ الترسيبِ، فهو دورٌ واضحٌ جدًّا، إذ تتبلورُ المعادنُ نتيجةَ التبخُّرِ، فتصطبغُ بألوانٍ معيَّنةٍ ويتوقفُ هذا على محتواها المائيِّ، وتتكوَّنُ رسوبياتٌ غرويَّةٌ colloidal sediments تجري في الماءِ وتتجددُ بأيوناتٍ معيَّنةٍ. وكذلك يتكوَّنُ

الكثيرُ من الموادِّ اللاصقةِ التي تربطُ بين الحبيباتِ المنقولةِ إلى أحواضِ الترسيب، فتكسبُ الصخورُ ألوانًا مميَّزةً. ومن هذه الصخورِ: الحجرُ الرمليُّ الحديديُّ.

وللماءِ دورٌ كبيرٌ أيضًا في تحديدِ ألوانِ الصخورِ أثناءَ عمليّاتِ التحوُّلِ metamorphic processes، وهي العمليّاتُ التي تحدثُ في قشرةِ الأرضِ وتصاحبُها تغيُّراتٌ في الضغطِ والحرارةِ، وتتحوَّلُ فيها المعادنُ أو يتغيَّرُ تركيبُها الكيميائيُّ وصفاتُها الفيزيائيَّةُ، وبالتالي يتغيَّرُ المظهرُ الخارجيُّ للصخرِ. ومن هذه العمليات: تحوُّلاتُ أكاسيدِ الحديدِ من الليمونيتِ إلى الهيماتيتِ أو الماجنتيت، وبالتالي هذا تغيُّرٌ واضحٌ في الألوانِ من اللونِ الأصفرِ إلى اللونِ الأحمرِ أو الأسودِ.

والآنَ عزيزي القارئ، هل توصَّلْتَ إلى فهمِ دورِ الماءِ في تلوينِ الصخورِ والجبالِ، هذه الحقيقةُ هي التي أشارَ إليها القرآنُ الكريمُ في الآيةِ الكريمةِ: (سورة فاطر: الآية 27).

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ أَنزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ ثَمَرَاتٍ مُّخْتَلِفًا أَلْوَانُهَا وَمِنَ الْجِبَالِ جُدَدٌ بِيضٌ وَحُمْرٌ مُّخْتَلِفٌ أَلْوَانُهَا وَغَرَابِيبُ سُودٌ ﴿٢٧﴾

أسئلة

1. ما الخصائصُ التي تعطي الماءَ دورًا مهمًّا في تلوينِ الصخورِ والجبالِ؟
2. اكتبْ معادلاتِ تفاعلِ أيونِ الحديدِ Fe^{2+} الذائبِ في الماءِ مع كلٍّ من أنيوناتِ الهيدروكسيدِ OH^-، والسيلكياتِ SiO_3^{2-}، والكربوناتِ CO_3^{2-} الذائبةِ.
3. ما الذي يعطي اللونَ الأحمرَ المتدرِّجَ للصخورِ؟
4. ما الفلزّاتُ الأشدُّ تأثُّرًا بظاهرةِ الامتصاص؟

القســـم 2-2

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يذكرُ أربعَ خصائصَ تجميعيَّةٍ للمحاليلِ، موضحًا سببَ تصنيفِها كخصائصَ تجميعيَّةٍ.
- يحسبُ الانخفاضَ في درجةِ التجمُّدِ والارتفاعَ في درجةِ الغليانِ ومولاليَّةَ المحاليلِ اللاإلكتروليتيَّةِ.
- يحسبُ التغيُّراتِ المتوقَّعةَ لدرجةِ التجمُّدِ ودرجةِ الغليانِ لمحلولٍ إلكتروليتيٍّ.
- يفسِّرُ أسبابَ اختلافِ الخصائصِ التجميعيَّةِ الملحوظةِ عمليًّا والخصائصِ التجميعيَّةِ المتوقَّعةِ للمحاليلِ الإلكتروليتيَّةِ.

الخصائصُ التجميعيَّةُ للمحاليلِ

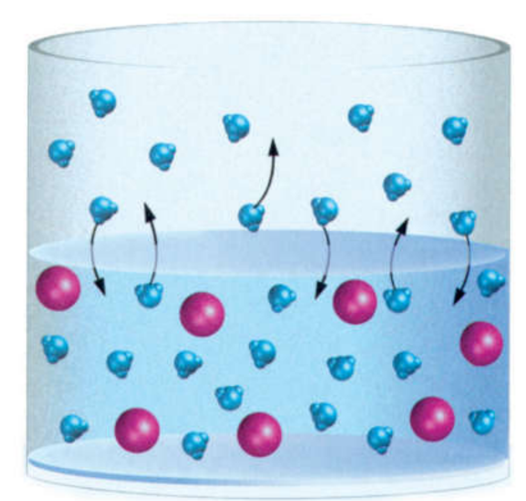
إن وجودَ المذابِ يؤثِّرُ في خصائصِ المحلولِ. فبعضُ هذه الخصائصِ لا تعتمدُ على طبيعةِ المادّةِ المذابةِ بل على عددِ جسيماتِها الموجودةِ في المحلولِ. ***تسمّى خصائصُ المحلولِ التي تعتمدُ على تركيزِ جسيماتِ المذابِ وليس على طبيعةِ هذه الجسيماتِ*** **الخصائصَ التجميعيَّةَ colligative properties**. وفي الحساباتِ المتعلِّقةِ بالخصائصِ التجميعيَّةِ يقاسُ التركيزُ بالمولاليَّةِ m.

انخفاضُ الضغطِ البخاريِّ

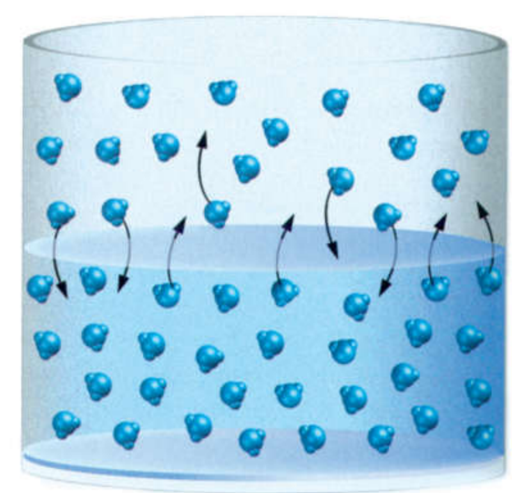
تختلفُ درجتا تجمُّدِ المحلولِ وغليانِه عن درجتَيْ تجمُّدِ المذيبِ النقيِّ وغليانِه. فالمذابُ غيرُ المتطايرِ يرفعُ درجةَ غليانِ المحلولِ ويخفضُ درجةَ تجمُّدِه. **المادةُ غيرُ المتطايرةِ nonvolatile substance** ***هي المادةُ التي لها ميلٌ ضعيفٌ لتصبحَ غازًا تحتَ الظروفِ القائمةِ.***

يغيِّرُ المذابُ غيرُ المتطايرِ درجتَيِ الغليانِ والتجمُّدِ. لفهمِ السببِ يلزمُكَ مراجعةُ الضغطِ البخاريِّ الذي درستَهُ سابقًا في الصفِّ الحادي عشرَ. إن الضغطَ البخاريَّ هو الضغطُ الذي تمارسُهُ الجزيئاتُ في الحالةِ الغازيةِ وهي في حالةِ اتزانٍ مع الحالةِ السائلةِ. لقد أوضحتِ التجاربُ أن الضغطَ البخاريَّ للمذيبِ الذي يحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ هو أقلُّ من الضغطِ البخاريِّ للمذيبِ النقيِّ عند درجةِ الحرارةِ نفسِها، كما يبيّنُ الشكلُ 2-6. وكلما زادَ عددُ جسيماتِ المذابِ في حجمٍ معيّنٍ من المحلولِ، قلَّتْ نسبةُ جزيئاتِ المذيبِ (الماءِ) من سطحِ المحلولِ. وسيتاحُ لقلَّةٍ من جزيئاتِ الماءِ فرصةُ الانفلاتِ من الحالةِ السائلةِ. ونتيجةً لذلك، تقلُّ فرصُ جزيئاتِ الماءِ لمغادرةِ المحلولِ والدخولِ في الطورِ الغازيِّ. لذلك يكونُ الضغطُ البخاريُّ للمحلولِ أقلَّ من الضغطِ البخاريِّ للماءِ النقيِّ.

وللمحاليلِ اللاإلكتروليتيَّةِ ذاتِ المولاليةِ الواحدةِ تركيزُ الجسيماتِ نفسُه. ويقلُّ الضغطُ البخاريُّ بالدرجةِ نفسِها في المحاليلِ المخفَّفةِ ذاتِ التركيزِ المولاليِّ الواحدِ المحتويةِ على أيِّ مذابٍ لاإلكتروليتي في المذيبِ نفسِه. فعلى سبيلِ المثالِ يقلِّلُ محلولٌ مائيٌّ للجلوكوزِ $C_6H_{12}O_6$ (لاإلكتروليت)، تركيزُه $1\ m$، الضغطَ البخاريَّ للماءِ بمقدارِ 5.5×10^{-4} atm عند درجةِ حرارةِ 25°C، و $1\ m$ من محلولِ السكروزِ $C_{12}H_{22}O_{11}$ وهو مذابٌ لاإلكتروليتيٌّ آخرُ يقلِّلُ الضغطَ البخاريَّ بمقدارِ 5.5×10^{-4} atm. ولأن خفضَ الضغطِ البخاريِّ يعتمدُ على تركيزِ المذابِ اللاإلكتروليتيِّ، وليس له علاقةٌ بنوعيَّةِ المذابِ، كانتِ الخاصَّةُ المكتسبةُ للمحلولِ خاصةً تجميعيَّةً.



محلولٌ مائيٌّ يحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ



ماءٌ نقيٌّ

رمزٌ استُخدِمَ لتمثيلِ السكروزِ $C_{12}H_{22}O_{11}$

رمزٌ استُخدِمَ لتمثيلِ الماءِ H_2O

الشكل 2-6 عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، يكونُ الضغطُ البخاريُّ للماءِ على الماءِ النقيِّ أكبرَ منه على المحلولِ المائيِّ الذي يحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ، كالسكروزِ.

انخفاضُ درجةِ التجمُّدِ

أثبتتِ التجربةُ أن درجةَ تجمُّدِ أيِّ محلولٍ مائيٍّ لمذابٍ لاإلكتروليتيٍّ، تركيزُه $1\ m$، هي أقلُّ من درجةِ تجمُّدِ الماءِ بـ $1.86°C$. وهذا يعني أنه عندَ إذابةِ $1\ mol$ من مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في $1\ kg$ من الماءِ تصبحُ درجةُ تجمُّدِ المحلولِ $-1.86°C$، بدلاً من $0.00°C$. وعند إذابةِ $2\ mol$ من مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في $1\ kg$ من الماءِ تصبحُ درجةُ تجمُّدِ المحلولِ $-3.72°C$، أي $(-1.86°C) \times 2$. إن قيمةَ المُعاملِ $(-1.86°C)$ تستخدمُ في الحقيقةِ لأيِّ تركيزٍ للمذابِ اللاإلكتروليتيِّ في الماءِ، فيمكنُ حسابُ الانخفاضِ في درجةِ تجمُّدِ المحلولِ باستخدامِ قيمةِ هذا المُعاملِ. تسمّى هذه القيمةُ **ثابتَ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ molal freezing-point constant** (K_f)، ***وتُعرَّفُ بأنها مقدارُ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ مذيبٍ في محلولٍ تركيزُه 1 مولل ويحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ ولاإلكتروليتيٍّ.***

إن لكلِّ مذيبٍ ثابتَ درجةِ تجمُّدٍ مولاليٍّ خاصًّا به. وتجدُ في الجدول 2-2 قيمَ K_f لعددٍ من المذيباتِ الشائعةِ. إن هذه القيمَ دقيقةٌ إلى حدٍّ بعيدٍ بالنسبةِ للمحاليلِ المخفَّفةِ تحت ضغطِ $1\ atm$. وقد ذُكرتْ بعضُ الاختلافاتِ في قيمةِ K_f الناتجةِ عن ضغوطٍ أخرى ومن تراكيزَ عاليةٍ للمحاليلِ. ويبيِّنُ الجدولُ أيضًا قيمًا لكمِّيّاتٍ ذاتِ علاقةٍ تسمّى K_b، وستجري دراستُها لاحقًا.

ووفقًا لما سبقَ ذكرُه، إن درجةَ تجمُّدِ محلولٍ يحتوي على $1\ mol$ من مذابٍ لاإلكتروليتي في $1\ kg$ من الماءِ هي أقلُّ من درجةِ تجمدِ الماءِ العاديَّةِ بـ $1.86°C$. وإن **انخفاضَ درجةِ التجمُّدِ freezing-point depression**، Δt_f، ***هو الفرقُ بين درجتَيْ تجمُّدِ المذيبِ النقيِّ ومحلولِ مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في ذلك المذيبِ، ويتناسبُ انخفاضُ درجةِ التجمُّدِ طرديًا مع التركيزِ المولاليِّ للمحلولِ.*** وكما اتَّضحَ من المثالِ السابقِ، تتضاعفُ

الجدول 2-2 ثابتا درجتَي التجمُّدِ والغليانِ المولاليّ

المذيب	درجةُ التجمُّدِ العاديةِ (^oC)	ثابتُ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ $K_f(^oC/m)$	درجةُ الغليانِ العاديَّة (^oC)	ثابتُ درجةِ الغليانِ المولاليِّ $K_b(^oC/m)$
حمضُ الأسيتيكِ	16.6	−3.90	117.9	3.07
الكافور	178.8	−39.7	207.4	5.61
الإيثر	−116.3	−1.79	34.6	2.02
نفثالين	80.2	−6.94	217.7	5.80
فينول	40.9	−7.40	181.8	3.60
الماء	0.00	−1.86	100.0	0.51

قيمةُ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ هي الأخرى عند تضاعفِ قيمةِ التركيزِ المولاليِّ. ويمكنُ أن تُحسبَ قيمةُ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ من خلالِ المعادلةِ التالية:

$$\Delta t_f = K_f\, m$$

يُعبَّرُ عن K_f بـ $^oC/m$، ويُعبَّرُ عن m بوحدةِ mol/kg (المولالية). ويُعبَّرُ عن Δt_f بالـ ^oC. تُبيِّنُ المسألتانِ النموذجيَّتانِ 2-3 و 2-4 كيف تُستخدَمُ هذه العلاقةُ لتحديدِ قيمةِ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ، وقيمةِ التركيزِ المولاليِّ للمحلولِ.

مسألةٌ نموذجية 2-3

ما مقدارُ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ الماءِ في محلولٍ محضَّرٍ من 17.1 g من السكروزِ $C_{12}H_{22}O_{11}$ و 200. g من الماءِ؟ ما درجةُ تجمُّدِ المحلولِ الفعليَّةُ؟

الحلّ

1 حلِّل

المعطى: كتلةُ المذابِ وصيغتُهُ الكيميائيَّةُ = 17.1 g من $C_{12}H_{22}O_{11}$

كتلةُ المذيبِ وهويتُه = 200. g من الماء

المجهول: أ. قيمةُ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ

ب. درجةُ تجمُّدِ المحلولِ

2 خطِّط

جدْ في الجدولِ 2-2 قيمةَ ثابتِ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ، K_f، للماءِ. لكي تَستخدمَ معادلةَ الانخفاضِ في درجةِ التجمُّدِ، $\Delta t_f = K_f\, m$، يلزمُكَ تحديدُ مولاليَّةِ المحلولِ.

$$\text{كمِّيَّةُ المذابِ (mol)} = \frac{\text{1 mol مذاب}}{\text{الكتلةُ الموليَّةُ للمذابِ (g)}} \times \text{كتلةُ المذابِ (g)}$$

$$\text{المولاليَّةُ} = \frac{\text{1000 g ماء}}{\text{1 kg ماء}} \times \frac{\text{كمِّيَّةُ المذابِ (mol)}}{\text{كتلةُ المذيبِ (g)}}$$

$$\Delta t_f = K_f\, m$$

$$\text{درجةُ تجمُّدِ المحلولِ} = \text{درجةُ تجمُّدِ المذيبِ} + \Delta t_f$$

3 احسبْ

$$17.1\ \text{g}\ C_{12}H_{22}O_{11} \times \frac{1\ \text{mol}\ C_{12}H_{22}O_{11}}{342.34\ \text{g}\ C_{12}H_{22}O_{11}} = 0.0500\ \text{mol}\ C_{12}H_{22}O_{11}$$

$$\frac{0.0500\ \text{mol}\ C_{12}H_{22}O_{11}}{200.\ \text{g ماء}} \times \frac{1000\ \text{g ماء}}{1\ \text{kg ماء}} = \frac{0.250\ \text{mol}\ C_{12}H_{22}O_{11}}{1\ \text{kg ماء}} = 0.250\ m$$

أ. $\Delta t_f = 0.250\ m \times (-1.86°\text{C}/m) = -0.465°\text{C}$

ب. درجةُ تجمُّدِ المحلولِ = $0.000°\text{C} + (-0.465°\text{C}) = -0.465°\text{C}$

مسألةٌ نموذجية 4-2

وُجِدَ أن محلولاً مائيًا، يحتوي على كمّيّةٍ مجهولةٍ من مذابٍ لاإلكتروليتيّ، له درجةُ تجمُّدٍ تساوي $-0.23°\text{C}$. ما قيمةُ التركيزِ المولاليِّ للمحلولِ؟

الحلّ

1 حلّلْ

المعطى: درجةُ تجمُّدِ المحلولِ = $-0.23°\text{C}$

المجهول: مولاليةُ المحلولِ

2 خطّطْ

الماءُ مذيبٌ شائعٌ، لذلك ستحتاجُ أن تعرفَ قيمةَ K_f، أي ثابتَ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ للماءِ، من الجدولِ 2-2. إن Δt_f لهذا المحلولِ هو الفرقُ بين درجةِ تجمُّدِ الماءِ ودرجةِ تجمُّدِ المحلولِ. استخدمْ معادلةَ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ لحسابِ المولاليَّةِ.

Δt_f = درجةَ تجمُّدِ المحلولِ − درجةِ تجمُّدِ المذيبِ النقيِّ

$\Delta t_f = K_f m$ استخدمِ المعادلةَ لإيجادِ m

$$m = \frac{\Delta t_f}{K_f}$$

3 احسبْ

$$\Delta t_f = -0.23°\text{C} - 0.00°\text{C} = -0.23°\text{C}$$

$$m = \frac{-0.23°\text{C}}{-1.86°\text{C}/m} = 0.12\ m$$

4 قيّمْ

وفقًا لما تبينَ من اختصارِ الوحداتِ، يعطي الجوابُ القيمةَ المولاليَّةَ المطلوبةَ. والجوابُ محدَّدٌ بشكلٍ صحيحٍ برقمَينِ معنويَّينِ.

تمارينُ تطبيقية

1. يتكونُ محلولٌ من 10.3 g من مذابِ الجلوكوزِ اللاإلكتروليتيِّ، $C_6H_{12}O_6$، ذائبةً في 250. g من الماءِ. ما قيمةُ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ المحلولِ؟
2. في تجربةٍ مختبريَّةٍ، وُجِدَ أن درجةَ تجمُّدِ محلولِ الجلوكوزِ المائيِّ كانت $-0.325°\text{C}$. فما التركيزُ المولاليُّ لهذا المحلولِ؟
3. إذا أُذيبَ 0.500 mol من مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في 500.0 g إيثر، فما درجةُ تجمُّدِ المحلولِ؟
4. درجةُ تجمُّدِ محلولٍ مائيٍّ يحتوي على مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ تبلغُ $-9.0°\text{C}$.
   أ. **ما** قيمةُ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ المحلولِ؟
   ب. **ما** التركيزُ المولاليُّ لهذا المحلولِ؟

الجواب

1. $-0.426°\text{C}$
2. $0.175\ m$
3. $-118.1°\text{C}$
4. أ. $-9.0°\text{C}$ ب. $4.8\ m$

ارتفاعُ درجةِ الغليانِ

تعلَّمتَ في الصفِّ الحادي عشرَ أن درجةَ غليانِ سائلٍ هي درجةُ الحرارةِ التي يتساوى فيها ضغطُهُ البخاريُّ مع الضغطِ الجويِّ. لذا، فإن التغيُّرَ في الضغطِ البخاريِّ للسائلِ يسبِّبُ تغيُّرًا مرافقًا في درجةِ الغليانِ. وكما ذُكر سابقًا، فإن الضغطَ البخاريَّ لمحلولٍ يحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ هو أقلُّ من الضغطِ البخاريِّ للمذيبِ النقيِّ. وهذا يعني أن طاقةً أكبرَ ستلزمُ لرفعِ الضغطِ البخاريِّ للمحلولِ كي يتساوى مع الضغطِ الجوّيِّ. لذلك، فإن درجةَ غليانِ المحلولِ أعلى من درجةِ غليانِ المذيبِ النقيِّ.

يعرَّفُ **ثابتُ درجةِ الغليانِ المولاليِّ molal boiling-point constant** (K_b) ***بأنه الارتفاعُ في درجةِ الغليانِ لمذيبٍ في محلولٍ تركيزُهُ 1 مولل ويحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ ولاإلكتروليتيٍّ***. وقد وُجِدَ عمليًّا أن الارتفاعَ في درجةِ غليانِ محلولٍ مائيٍّ تركيزُهُ 1مولل، ويحتوي على أيِّ مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ، هي $0.51^{\circ}C$. لذلك، فإن ثابتَ درجةِ الغليانِ المولاليِّ للماءِ هو $0.51^{\circ}C/m$.

وهكذا فإن قيمَ ثابتِ درجةِ الغليانِ المولاليِّ تختلفُ تبعًا لاختلافِ المذيباتِ. يتضمَّنُ الجدول 2-2 بعضَ قيمٍ أخرى لـ K_b، وهي، كقيمِ ثابتِ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ، أكثرُ دقَّةً في المحاليلِ المخفَّفةِ.

يُعرَّفُ **ارتفاعُ درجةِ الغليانِ boiling-point elevation**، (Δt_b)، ***بأنه الفرقُ بين درجتَيْ غليانِ المذيبِ النقيِّ ومحلولِ مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في ذلك المذيبِ، وتتناسبُ قيمةُ الارتفاعِ في درجةِ الغليانِ طرديًا مع التركيزِ المولاليِّ لذلك المحلولِ***. ويمكنُ حسابُ الارتفاعِ في درجةِ الغليانِ من خلالِ المعادلةِ التاليةِ:

$$\Delta t_b = K_b m$$

وعندما يعبَّرُ عن K_b بـ $^{\circ}C/m$ وعن m بوحدةِ mol/kg، يقاسُ الارتفاعُ في درجةِ الغليانِ، Δt_b، بـ $^{\circ}C$.

مسألةٌ نموذجية 2-5

ما قيمةُ ارتفاعِ درجةِ غليانِ محلولٍ مكوَّنٍ من 20.1 g من مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ أُذيبَتْ في 400.0 g من الماءِ؟ الكتلةُ الموليَّةُ للمذابِ هي 62.0 g.

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: كتلةُ المذابِ = 20.1 g

الكتلةُ الموليَّةُ للمذابِ = 62.0 g

كتلةُ المذيبِ وهويتُه = 400.0 g ماء

المجهول: قيمةُ ارتفاعِ درجةِ الغليانِ

2 خطِّطْ

جدْ في الجدول 2-2 قيمةَ ثابتِ درجةِ الغليانِ المولاليِّ، K_b، للماءِ. لكي تستخدمَ معادلةَ ارتفاعِ درجةِ الغليانِ، $\Delta t_b = K_b m$، يلزمُكَ تحديدُ مولاليَّةِ المحلولِ.

$$\text{كمّيّةُ المذابِ (mol)} = \frac{\text{1 mol مذاب}}{\text{الكتلةِ المولِيَّةِ للمذابِ (g)}} \times \text{كتلةِ المذابِ (g)}$$

$$\text{المولاليَّةُ} = \frac{\text{1000 g ماء}}{\text{1 kg ماء}} \times \frac{\text{كمّيَّةِ المذابِ (mol)}}{\text{كتلةِ المذيبِ (g)}}$$

$$\Delta t_b = K_b m$$

3 احسبْ

$$0.324\ \text{mol مذاب} = \frac{1\ \text{mol مذاب}}{62.0\ \text{g مذاب}} \times 20.1\ \text{g مذاب}$$

$$\frac{0.324\ \text{mol مذاب}}{400.0\ \text{g ماء}} \times \frac{1000\ \text{g ماء}}{1\ \text{kg ماء}} = 0.810\ \frac{1\ \text{mol مذاب}}{1\ \text{kg ماء}} = 0.810\ m$$

$$\Delta t_b = 0.810\ m \times 0.51°\text{C}/m = 0.41°\text{C}$$

تمارينُ تطبيقية

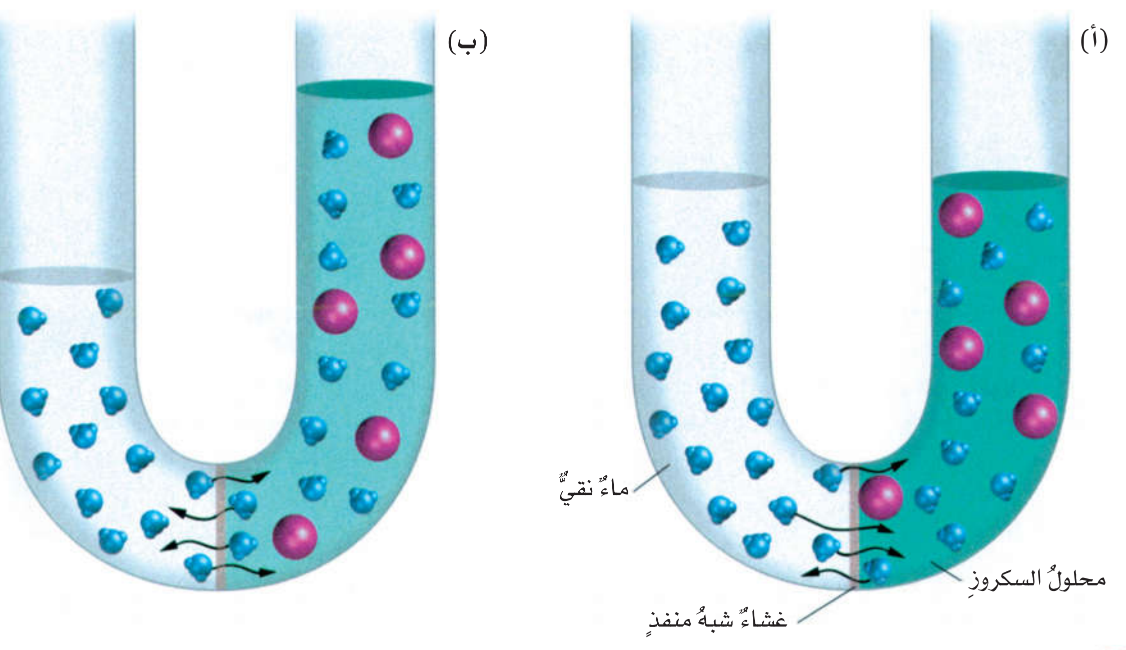
1. يحتوي محلولٌ على 50.0 g من السكروزِ $C_{12}H_{22}O_{11}$ كمذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في 500.0 g من الماءِ. ما قيمةُ الارتفاعِ في درجةِ غليانِ المحلولِ؟
2. يحتوي محلولٌ على 450.0 g من السكروزِ $C_{12}H_{22}O_{11}$ كمذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في 250.0 g من الماءِ. ما قيمةُ درجةِ غليانِ المحلولِ؟
3. إذا بلغَتْ قيمةُ ارتفاعِ درجةِ غليانِ محلولٍ مائيٍّ، يحتوي على لاإلكتروليتٍ غيرِ متطايرٍ، 1.02°C، فما قيمةُ مولاليَّةِ المحلولِ؟
4. تبلغُ درجةُ غليانِ محلولٍ مائيٍّ، يحتوي على لاإلكتروليتٍ غيرِ متطايرٍ، 100.75°C.
   أ. ما قيمةُ ارتفاعِ درجةِ الغليانِ؟
   ب. ما قيمةُ مولاليَّةِ المحلولِ؟

الجواب
1. 0.15°C
2. 102.7°C
3. 2.0 m
4. أ. 0.75°C
   ب. 1.5 m

الضغطُ الأسموزيُّ

يوضحُ الشكلُ 7-2 خاصَّةً تجميعيَّةً أخرى إذ يَظهرُ محلولُ السكروزِ مفصولاً عن الماءِ النقيِّ بغشاءٍ شبهِ منفذٍ. ***ويسمحُ الغشاءُ شبهُ المنفذ*** **semipermeable membrane** ***بمرورِ بعضِ جسيماتِ المحلولِ ويمنعُ مرورَ البعضِ الآخر.*** الملاحظُ أن مستوى محلولِ السكروزِ سيرتفعُ في الأنبوبِ وصولاً إلى مستوًى معيَّنٍ. فما الذي يسبِّبُ ارتفاعَ مستوى هذا المحلولِ؟

يسمحُ الغشاءُ شبهُ المنفذِ بمرورِ جزيئاتِ الماءِ، ولا يسمحُ بمرورِ جزيئاتِ السكروزِ. وتسمحُ جزيئاتُ السكروزِ من جانبِ المحلولِ بأن يرتطمَ بالغشاءِ عددٌ من جزيئاتِ الماءِ أقلُّ من عددِ جزيئاتِ الماءِ من جانبِ الماءِ النقيِّ في الفترةِ الزمنيَّةِ نفسِها. لذلك يكونُ معدَّلُ انتقالِ جزيئاتِ الماءِ من جهةِ الماءِ النقيِّ إلى جهةِ محلولِ السكروزِ أكبرَ من معدَّلِ انتقالِها من الجهةِ الأخرى. يؤدّي هذا الاختلافُ في معدَّلِ انتقالِ جزيئاتِ الماءِ إلى



الشكل 7-2 (أ) عندما يُفصَلُ الماءُ النقيُّ عن محلولِ السكروزِ المائيِّ بغشاءٍ شبهِ منفذٍ تنحصرُ حركةُ جزيئاتِ الماءِ في عبورِها للغشاءِ من جهةِ الماءِ النقيِّ إلى جهةِ المحلولِ المائيِّ. (ب) يرتفعُ مستوى المحلولِ حتى يتساوى الضغطُ الذي يمارسُهُ ارتفاعُ عمودِ المحلولِ مع الضغطِ الأسموزي. عند هذه النقطةِ يتساوى عددُ جزيئاتِ الماءِ الداخلةِ وعددُ جزيئاتِ الماءِ الخارجةِ عبر الغشاءِ.

ارتفاع مستوى الماءِ في جهةِ محلولِ السكروزِ. ويستمرُّ ارتفاعُ مستوى المحلولِ حتى يصبحَ الضغطُ الذي يمارسُهُ ارتفاعُ المحلولِ كبيرًا إلى درجةٍ تكفي لدفعِ جزيئاتِ الماءِ رجوعًا عبر الغشاءِ بمعدَّلٍ يساوي معدَّلَ انتقالِ جزيئاتِ الماءِ من جهةِ الماءِ النقيِّ.

حركةُ انتقالِ جزيئاتِ المذيبِ عبرَ الغشاءِ شبهِ المنفذِ من جهةِ تركيزِ المذابِ الأقلِّ إلى جهةِ تركيزهِ الأعلى تسمّى **الأسموزيةَ أو التناضح osmosis**. وتحصلُ الأسموزيَّةُ ما دامَ يوجدُ محلولانِ مختلفانِ في تركيزِهما ومنفصلانِ بعضُهما عن بعضٍ بغشاءٍ شبهِ منفذٍ. و**الضغطُ الأسموزيُّ osmotic pressure** ***هو الضغطُ الخارجيُّ الذي يلزمُ لإيقافِ عمليَّةِ الأسموزيَّةِ (التناضح)***. وفي المثالِ السابقِ تسبِّبُ الأسموزيَّةُ ارتفاعَ مستوى سطحِ المحلولِ إلى أن يوفِّرَ ارتفاعُ المحلولِ ضغطًا كافيًا لإيقافِها. وبما أن الضغطَ الأسموزيَّ يعتمدُ على تركيزِ المحلولِ لا على نوعِ جسيماتِ المذابِ، فالظاهرةُ الأسموزيَّةُ خاصَّةٌ تجميعيَّةٌ. وكلما زادَ تركيزُ المحلولِ زادَ الضغطُ الأسموزيُّ للمحلولِ.

إن تنظيمَ الأسموزيَّةِ من الأمورِ الحيويَّةِ في حياةِ الخليَّةِ. وبما أن غشاءَ الخليَّةِ هو غشاءٌ شبهُ منفذٍ، فإن الخليَّةَ تفقدُ بعضًا من الماءِ وتتقلَّصُ عندما توضعُ في محلولٍ عالي التركيزِ. وهي تمتصُّ الماءَ وتنتفخُ عند وضعِها في محلولٍ قليلِ التركيزِ. لكن الحيواناتِ الفقاريَّةَ تقي خلاياها من عمليَّةِ التقلُّصِ والانتفاخِ بواسطةِ الدمِ واللمفِ المحيطَينِ بها. والدمُ واللمفُ لهما تركيزانِ يشبهانِ التركيزَ داخلَ الخليَّةِ.

الإلكتروليتاتُ والخصائصُ التجميعيّةُ

وجد أن موادَّ معيّنةً تسبِّبُ انخفاضًا في درجةِ تجمُّدِ مذيبٍ أو ارتفاعًا في درجةِ غليانِ مذيبٍ أكثرَ من المتوقَّع. فعلى سبيلِ المثالِ يخفضُ محلولُ كلوريدِ الصوديوم $0.1\ m$ NaCl، درجةَ تجمُّدِ المذيبِ ضعفَيْ ما يخفضُهُ محلولُ السكروزِ بالتركيزِ نفسِه. ويخفضُ محلولٌ من كلوريدِ الكالسيوم $0.1\ m\ CaCl_2$، درجةَ تجمُّدِ المذيبِ ثلاثةَ أمثالِ ما يخفضُهُ محلولُ السكروزِ بالتركيزِ نفسِه. وإن التأثيرَ على رفعِ درجاتِ الغليانِ يماثلُ التأثيرَ على خفضِ درجاتِ التجمُّدِ.

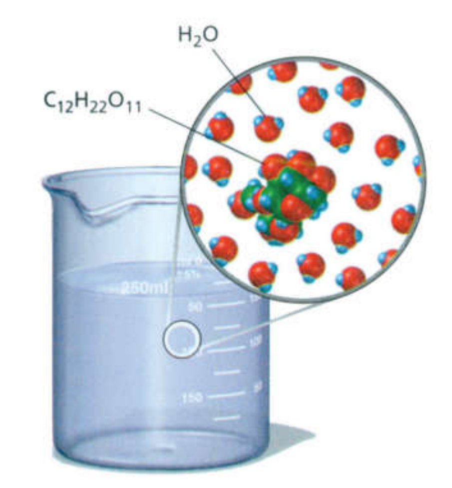
ولكي تفهمَ سببَ هذه التأثيراتِ قارنْ سلوكَ السكروزِ مع كلوريدِ الصوديوم في المحلولِ المائيِّ. فالسكروزُ، وهو مركَّبٌ لاإلكتروليتيٌّ، كلُّ جزيءٍ منه يذوبُ لينتجَ جسيمًا واحدًا في المحلول. فلذلك، كل 1 mol من السكروزِ يذوبُ ينتجُ 1 mol من الجسيماتِ في المحلولِ. و NaCl، وهو إلكتروليتٌ قويٌّ، كلُّ 1 mol منه يذوبُ ينتجُ 2 mol من الجسيماتِ في المحلولِ، وهما 1 mol من أيوناتِ الصوديوم و 1 mol من أيوناتِ الكلوريدِ. الشكل 2-8 يقارنُ بين الجسيماتِ الناتجةِ في المحلولِ لثلاثةِ مذاباتٍ مختلفةٍ. ويمكنُكَ أن تلاحظَ أن الإلكتروليتاتِ تنتجُ أكثرَ من 1 mol من جسيماتِ المذابِ لكلِّ 1 mol من المركّبِ الذائبِ.

الكيمياءُ تطبيقيًّا

تنقيةُ الماءِ بعمليةِ الأسموزيةِ العكسيةِ (التناضحِ العكسيِّ)

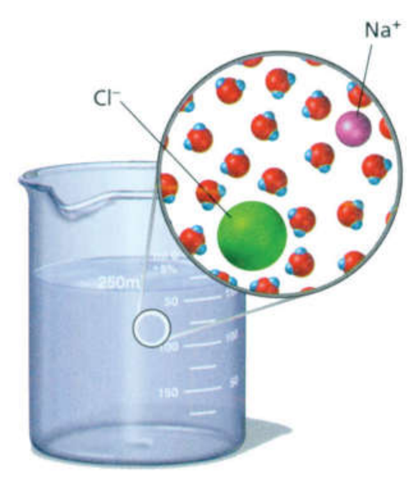
تستخدمُ الأسموزيَّةُ العكسيَّةُ (التناضحُ العكسيُّ) في تنقيةِ المياهِ، لأنها تعملُ على إزالةِ عددٍ من الملوِّثاتِ بتكلفةٍ قليلةٍ نسبيًّا. يمكنُ عكسُ عمليَّةِ الأسموزيَّةِ من خلالِ ممارسةِ ضغطٍ أعلى من الضغطِ الأسموزيِّ على محلولٍ مائيٍّ. يؤدّي ذلك إلى تسرُّبِ جزيئاتِ الماءِ، دون جزيئاتِ المذابِ فيه، عبر غشاءٍ شبهِ منفذٍ. وتستخدمُ معظمُ محطاتِ تحليةِ المياهِ في العالمِ عمليَّةَ الأسموزيَّةِ العكسيةِ في إزالةِ الأملاحِ من مياهِ البحرِ لإنتاجِ ملايينِ الأمتارِ المكعبةِ من الماءِ الصالحِ للشربِ يوميًّا. ومن الاستخداماتِ التقنيةِ الأخرى لظاهرةِ الأسموزيَّةِ العكسيَّةِ، بالإضافةِ إلى تحليةِ مياهِ البحرِ، تنقيةُ مياهِ الصرفِ وتحويلُها إلى مياهٍ مكرَّرةٍ صالحةٍ للاستخدامِ.

الشكل 2-8 قارنْ بين أعدادِ الجسيماتِ المنتَجةِ من وحداتِ صيغِ المذاباتِ الثلاثة. تعتمدُ الخصائصُ التجميعيَّةُ على التركيزِ الكلِّيِّ للجسيماتِ.



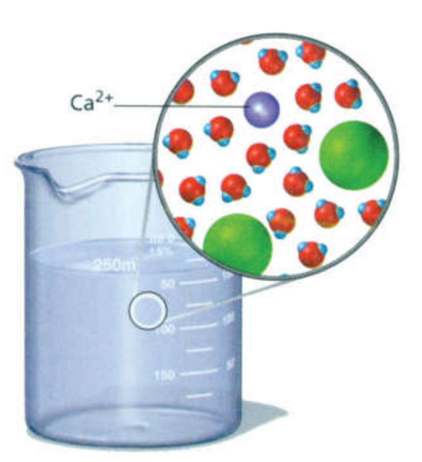
محلولُ السكروزِ

$$C_{12}H_{22}O_{11}(s) \xrightarrow{H_2O} C_{12}H_{22}O_{11}(aq)$$



محلولُ كلوريدِ الصوديوم

$$NaCl(s) \xrightarrow{H_2O} Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$



محلولُ كلوريدِ الكالسيوم

$$CaCl_2(s) \xrightarrow{H_2O} Ca^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq)$$

قيمٌ محسوبةٌ لمحاليلَ إلكتروليتيّةٍ

تذكّر أن الخصائصَ التجميعيَّةَ تعتمدُ على التركيزِ الكلّيِّ لجسيماتِ المذابِ، بغضِّ النظرِ عن نوعيته. إن التغيُّراتِ في الخصائصِ التجميعيَّةِ للمحاليل، التي سبَّبَتْها الإلكتروليتاتُ، تتناسبُ طرديًّا مع التركيزِ المولاليِّ الكلّيِّ للجسيماتِ المذابةِ جميعًا، وليس لوحداتِ الصيغة. فمن المتوقَّعِ أن يكونَ تأثيرُ التركيزِ المولاليِّ لمحلول كلوريدِ الصوديوم على الخصائصِ التجميعيَّةِ ضعفَ تأثيرِ محلولِ السكروزِ بالتركيزِ نفسِه. ولكن ماذا بالنسبةِ إلى نيتراتِ الباريوم، $Ba(NO_3)_2$؟ من المعروفِ أن كلَّ 1 mol من نيتراتِ الباريوم يُنتِجُ 3 mol من الأيوناتِ في المحلول.

$$Ba(NO_3)_2(s) \rightarrow Ba^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq)$$

فالمتوقَّعُ، أن تقلِّلَ نيتراتُ الباريوم، الذائبةُ في محلولٍ ذي مولاليَّةٍ معيَّنةٍ، درجةَ تجمُّدِ المذيبِ بمقدارِ ثلاثةِ أمثالِ ما يقلِّلُهُ مذابٌ لاإلكتروليتيٌّ عند ذوبانِهِ في المذيبِ نفسِه وبالتركيزِ المولاليِّ نفسِه.

مسألةٌ نموذجية 2-6

ما التغيرُ المتوقَّعُ في درجةِ تجمُّدِ الماءِ في محلولٍ مكوَّنٍ من 62.5 g من نيتراتِ الباريوم، $Ba(NO_3)_2$، و 1.00 kg من الماءِ؟

الحلّ

1 حلّل

المعطى: كتلةُ المذابِ وصيغتُه = 62.5 g من $Ba(NO_3)_2$

كتلةُ المذيبِ وهويتُه = 1.00 kg من الماءِ

$\Delta t_f = K_f m$

المجهول: قيمةُ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ المتوقَّعةُ

2 خطّطْ

يمكنُ حسابُ المولاليةِ بتحويلِ كتلةِ المذابِ إلى مولات، ثم تقسيمِ ذلك على عددِ كيلوجراماتِ المذيبِ. أُخِذَتْ هذه المولاليَّةُ على أساسِ وحدةِ صيغةِ $Ba(NO_3)_2$، ويجبُ تحويلُها إلى مولاليَّةٍ على أساسِ عددِ الأيوناتِ المتفكِّكةِ في المحلولِ. لذلك، يجبُ ضربُها في عددِ مولاتِ الأيوناتِ الناتجةِ من مولٍ واحدٍ من وحدةِ الصيغةِ. نستخدمُ المولاليَّةَ المعدَّلةَ هذه بعدئذٍ لنحسبَ مقدارَ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ.

$$\text{مولاليَّةُ المحلولِ}\left(\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right) = \frac{\text{مذاب 1 mol}}{\text{الكتلةُ الموليَّةُ للمذابِ (g)}} \times \frac{\text{كتلةُ المذابِ (g)}}{\text{كتلةُ المذيبِ (kg)}}$$

$$\text{مولاليَّةُ المحلولِ}\left(\frac{\text{mol}}{\text{kg}}\right) \times \text{تحويلُ المولاليَّةِ}\left(\frac{\text{mol أيونات}}{\text{mol}}\right) \times K_f\left(\frac{{}^\circ C \cdot kg\ H_2O}{\text{mol أيونات}}\right)$$

$$= \text{مقدارَ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ المتوقَّعةِ } ({}^\circ C)$$

تشبهُ هذه المسألةُ ما جاءَ في المسألةِ النموذجيَّةِ 2-5، غيرَ أن المذابَ أيونيٌّ وليس جزيئيًّا. وبذلك، يساوي عددُ الجسيماتِ في المحلولِ عددَ أيوناتِ المذابِ.

3 احسبْ

$$\frac{62.5\ \cancel{g\ Ba(NO_3)_2}}{1.00\ kg\ H_2O} \times \frac{mol\ Ba(NO_3)_2}{261.35\ \cancel{g\ Ba(NO_3)_2}} = \frac{0.239\ mol\ Ba(NO_3)_2}{kg\ H_2O}$$

$$Ba(NO_3)_2(s) \rightarrow Ba^{2+}(aq) + 2NO_3^-(aq)$$

كلُّ وحدةِ صيغةٍ لنيتراتِ الباريوم تنتجُ ثلاثةَ أيوناتٍ في المحلول.

$$\frac{0.239 \text{ mol } Ba(NO_3)_2}{\text{kg } H_2O} \times \frac{3 \text{ mol أيونات}}{\text{mol } Ba(NO_3)_2} \times \frac{-1.86^{\circ}C \cdot \text{kg } H_2O}{\text{mol أيونات}} = -1.33^{\circ}C$$

4 قيِّمْ اختُصِرتِ الوحداتُ بشكلٍ صحيحٍ لإعطاءِ الجوابِ المتوقَّعِ بـ °C. وقد قُرِّبَ الجوابُ بشكلٍ صحيحٍ إلى ثلاثةِ أرقامٍ معنويَّةٍ.

تمارينُ تطبيقية

1. ما مقدارُ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ المتوقَّعِ لمحلولٍ يحتوي على 2.0 mol من كبريتاتِ المغنيسيوم ذائبةً في 1.0 kg ماء؟
2. ما مقدارُ ارتفاعِ درجةِ الغليانِ المتوقَّعِ للماءِ في محلولٍ يحتوي على 150 g من كلوريدِ الصوديوم ذائبةً في 1.0 kg ماء؟
3. إذا كانت درجةُ التجمُّدِ لمحلولٍ مائيٍّ لكلوريدِ الصوديوم −0.20°C، فما مولاليَّةُ هذا المحلول؟

الجواب

1. −7.4°C
2. 2.6°C
3. 0.054 *m* NaCl

قيمٌ فعليَّةٌ لمحاليلَ إلكتروليتيَّة

من المهمِّ التذكّرُ أن القيمَ التي تمَّ حسابُها أعلاهُ هي قيمٌ تقريبيَّةٌ متوقَّعةٌ. فكما ذُكرَ، إن محلولَ 0.1 *m* من كلوريدِ الصوديوم يخفضُ درجةَ التجمُّدِ ضعفَ ما يخفضُهُ محلولُ 0.1 *m* من السكروز. إن القيمَ الفعليَّةَ للخصائصِ التجميعيَّةِ للإلكتروليتاتِ القويَّةِ كلِّها هي تقريبًا ما تتوقَّعُهُ اعتمادًا على عددِ الجسيماتِ التي تنتجُها في المحلول. وقد أُعطيَتْ بعضُ الأمثلةِ في الجدول 2-3. إن انخفاضَ درجةِ تجمُّدٍ يسبِّبُهُ مركَّبٌ ينتجُ أيونينِ لكلِّ وحدةِ صيغةٍ، يساوي ضعفَ ما يسبِّبُهُ مركّبٌ لاإلكتروليتيٌّ في المذيبِ نفسِه. وإن انخفاضَ درجةِ تجمدٍ يسبِّبُهُ مركَّبٌ يُنتِجُ ثلاثةَ أيوناتٍ لكلِّ وحدةِ صيغةٍ يساوي ثلاثةَ أمثالِ ما يسبِّبُهُ مركَّبٌ لاإلكتروليتيٌّ في المذيبِ نفسِه.

الجدول 3-2 انخفاضُ درجةِ التجمُّدِ لمحاليلَ مائيَّةٍ لمذاباتٍ أيونيَّةٍ

المذاب	التركيز (*m*)	Δt_f المقيسة (°C)	Δt_f لمحلولٍ لاإلكتروليتيٍّ (°C)	Δt_f المقيسةُ لمحلولٍ / Δt_f لمحلولٍ لاإلكتروليتيٍّ
KCl	0.1	−0.345	−0.186	1.85
	0.01	−0.0361	−0.0186	1.94
	0.001	−0.00366	−0.00186	1.97
$MgSO_4$	0.1	−0.225	−0.186	1.21
	0.01	−0.0285	−0.0186	1.53
	0.001	−0.00338	−0.00186	1.82
$BaCl_2$	0.1	−0.470	−0.186	2.53
	0.01	−0.0503	−0.0186	2.70
	0.001	−0.00530	−0.00186	2.84

راجع القيمَ المعطاةَ في الجدول 2-3 للمحلول KCl تجدْ أن انخفاضَ درجةِ تجمُّدِ محلولِ $0.1\ m$ KCl هو أكبرُ فقط بـ 1.85 مرَّةٍ من انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ محلولٍ لاإلكتروليتيٍّ، وكلَّما قلَّ التركيزُ اقتربتْ قيمةُ انخفاضِ درجةِ التجمُّدِ من ضعفَيْ قيمةِ انخفاضِ المحلولِ اللاإلكتروليتيِّ.

إن الفرقَ بين القيمتَينِ المتوقَّعةِ والمقيسةِ سببُهُ قوى التجاذبِ الموجودةُ بين الأيوناتِ المتفككةِ في المحلولِ المائيِّ. إذ إن تجاذبَ الأيوناتِ في المحاليلِ العاليةِ التركيزِ أكبرُ من تجاذبِها في المحاليلِ المخفَّفةِ.

وتجذبُ الأيوناتُ ذاتُ الشحنةِ الأعلى الأيوناتِ الأخرى بقوةٍ شديدةٍ. لذلك تتجمَّعُ أكثرَ ويكونُ لها تركيزٌ مؤثِّرٌ أقلُّ من تركيزِ الأيوناتِ ذاتِ الشحنةِ الأصغرِ. وعلى سبيلِ المثالِ، الأيوناتُ التي يكوِّنُها $MgSO_4$ لها شحنتان +2 و −2 والأيوناتُ التي يكوِّنُها KCl لها شحنتان +1 و −1. لاحظْ أن محلولَ $MgSO_4$ في الجدولِ 2-3 لا تنخفضُ درجةُ تجمُّدِهِ بقدرِ ما تنخفضُ درجةُ تجمُّدِ محلولِ KCl ذي التركيزِ نفسِه.

الشكل 2-9 الأملاحُ التي تُرشُّ على الطرقِ الجليديَّةِ هي إلكتروليتاتٌ. وظيفةُ هذه الأملاحِ خفضُ درجةِ تجمُّدِ الماءِ وبالتالي انصهارُ الثلجِ.

مراجعةُ القسم 2-2

1. ما الخصائصُ التجميعيَّةُ المتوقَّعُ ظهورُها في الحالاتِ التاليةِ؟

أ. إضافةُ مادةٍ مضادَّةٍ للتجمُّدِ إلى نظامِ التبريدِ في سيارةٍ عندَما تنخفضُ درجةُ حرارةِ الهواءِ إلى ما دونَ الصفرِ المئويِّ.

ب. انصهارُ الثلجِ على جانبيِ الطرقاتِ بعد رشِّ الملحِ فوقَه.

2. أذيبَ 2 mol من مذابٍ لاإلكتروليتيٍّ في 1 kg من مذيبٍ مجهولٍ. فإذا صارَ المحلولُ يتجمَّدُ دون درجةِ تجمدِهِ العاديةِ بـ 7.8°C، احسبْ ثابتَ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ للمذيبِ المجهولِ. ما هويةُ المذيبِ؟

3. إذا فُصِلَ محلولانِ متساويا الكمِّيَّةِ موجودانِ في أنبوبٍ بشكلِ الحرفِ U بغشاءٍ شبهِ منفذٍ، فأيُّ مستويَي المحلولَينِ يرتفعُ: مستوى الأكثرِ تركيزًا أم مستوى الأقلِّ تركيزًا؟

4. أ. احسبْ مقدارَ الانخفاضِ المتوقَّعِ في درجةِ تجمُّدِ محلولٍ من $0.200\ m\ KNO_3$.

ب. هل تقاربُ القيمةُ المحسوبةُ مقدارَ الانخفاضِ الفعليِّ لدرجةِ تجمُّدِ المحلولِ؟ علِّلِ السببَ.

تفكيرٌ ناقد

5. علاقاتٌ استدلاليَّة: تبلغُ قيمُ انخفاضِ درجاتِ تجمُّدِ المحاليلِ أ، ب، ج، على التوالي −1.2°C، −2.3°C، −4.1°C. توقَّعْ تسلسلَ ارتفاعِ درجاتِ غليانِ هذه المحاليلِ من القيمةِ الصغرى إلى الكبرى. فسِّرِ السببَ في هذا التسلسلِ.

مراجعةُ الفصل 2

ملخّصُ الفصل

1-2

- عمليةُ فصلِ الأيوناتِ التي تتمُّ عند ذوبانِ مادةٍ صلبةٍ أيونيَّةٍ تسمَّى التفكُّكَ.
- عند خلطِ محلولين أيونيَّين مختلفَين يمكنُ أن يتكوَّنَ راسبٌ بتفاعلِ أيوناتٍ من المحلولَين لتكوينِ مركَّبٍ غيرِ قابلٍ للذوبانِ.
- تتضمَّنُ المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ لتفاعلٍ في محلولٍ مائيٍّ، المركَّباتِ والأيوناتِ التي تتغيَّرُ كيميائيًّا في التفاعلِ فقط. والأيوناتُ المتفرِّجةُ هي الأيوناتُ التي لا تشتركُ في هذا التفاعلِ.
- عمليةُ تكوينِ الأيوناتِ من المركَّباتِ الجزيئيَّةِ تسمّى التأيُّنَ. قد يتأيَّنُ المركَّبُ الجزيئيُّ في المحلولِ المائيِّ إذا كانتْ قوى الجذبِ التي تمارسُها جزيئاتُ الماءِ القطبيَّةُ من القوَّةِ بحيثُ تكسرُ الروابطَ التساهميَّةَ-القطبيَّةَ لجزيئاتِ المذابِ.
- يسمّى أيونُ H_3O^+ أيونَ الهيدرونيوم.
- يوجدُ الإلكتروليتُ القويُّ الذائبُ على شكلِ أيوناتٍ في محلولٍ مائيٍّ، بينما توجدُ كمّيَّةٌ ضئيلةٌ فقط من الإلكتروليتِ الضعيفِ الذائبِ كأيوناتٍ في محلولٍ مائيٍّ.

المفردات

- التفكُّك (39) dissociation
- المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ (43) net ionic equation
- الأيوناتُ المتفرِّجةُ (43) spectator ions
- التأيُّن (45) ionization
- أيونُ الهيدرونيوم (45) hydronium ion
- الإلكتروليتُ القويُّ (46) strong electrolyte
- الإلكتروليتُ الضعيفُ (47) weak electrolyte

2-2

- تعتمدُ الخصائصُ التجميعيَّةُ للمحاليلِ على العددِ الكلّيِّ لجسيماتِ المذابِ الموجودةِ في المحلولِ. الخصائصُ التجميعيَّةُ للمحاليلِ تتمثَّلُ في ارتفاعِ درجةِ الغليانِ وانخفاضِ درجةِ التجمُّدِ وانخفاضِ الضغطِ البخاريِّ والضغطِ الأسموزيِّ.
- يستخدَمُ كلٌّ من ثابتِ درجةِ الغليانِ المولاليِّ وثابتِ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ لحسابِ مقدارِ ارتفاعِ درجةِ الغليانِ وانخفاضِ درجةِ تجمُّدِ المذيباتِ المحتويةِ على مذاباتٍ غيرِ متطايرةٍ.
- للإلكتروليتاتِ تأثيرٌ على درجتَيِ غليانِ المذيباتِ وتجمُّدِها أكبرُ من تأثيرِ الموادِّ اللاإلكتروليتيَّةِ.
- تقلُّ قيمُ الخصائصِ التجميعيَّةِ في المحاليلِ الإلكتروليتيَّةِ، عدا المحاليلِ المخفَّفةِ كثيرًا، عما هو متوقَّعٌ بسببِ قوى التجاذبِ بين الأيوناتِ في المحلولِ.

المفردات

- الخصائصُ التجميعيَّةُ (50) colligative properties
- المادةُ غيرُ المتطايرةِ (50) nonvolatile substance
- ثابتُ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ (51) molal freezing-point constant, K_f
- انخفاضُ درجةِ التجمُّدِ (51) freezing-point depression, Δt_f
- ثابتُ درجةِ الغليانِ المولاليِّ (54) molal boiling-point constant, K_b
- ارتفاعُ درجةِ الغليانِ (54) boiling-point elevation, Δt_b
- الغشاءُ شبهُ المنفذِ (55) semipermeable membrane
- الأسموزيَّةُ (56) osmosis
- الضغطُ الأسموزيُّ (56) osmotic pressure

مراجعةُ الفصل 2

اختيارٌ من متعدِّد

1. حمضُ الأسيتيكِ إلكتروليتٌ ضعيفٌ لأنه

أ. يمتزجُ مع الماءِ.

ب. يكوِّنُ أيوناتِ الهيدرونيومِ والهيدروكسيدِ في المحلولِ المائيِّ.

ج. يخفضُ درجةَ تجمُّدِ الماءِ.

د. يتأيَّنُ قليلٌ منه في المحلولِ المائيِّ.

2. أيُّ المحاليلِ التاليةِ يحتوي على أعلى تركيزٍ من أيوناتِ الهيدرونيوم، H_3O^+؟

أ. $0.10\ M\ HCl$　　ج. $0.10\ M\ CH_3COOH$

ب. $0.10\ M\ HF$　　د. $0.10\ M\ NaCl$

3. أيٌّ من التالي يُعدُّ أحسنَ تمثيلاً لتفاعلِ الترسيبِ الذي يحدثُ لدى مزجِ محلولَينِ مائيَّينِ من كربوناتِ الصوديومِ وكلوريدِ الكالسيومِ؟

أ. $Na^+(aq) + Cl^-(aq) \rightarrow NaCl(s)$

ب. $2Na^+(aq) + CO_3^{2-}(aq) + Ca^{2+}(aq) + 2Cl^-(aq) \rightarrow CaCO_3(s) + 2NaCl(s)$

ج. $Ca^{2+}(aq) + CO_3^{2-}(aq) \rightarrow CaCO_3(s)$

د. لا يحدثُ تفاعلُ ترسيبٍ.

4. أيٌّ من التالي لا يمثِّلُ خاصةً تجميعيَّةً للمحاليلِ.

أ. المولاليَّة.

ب. انخفاضُ الضغطِ البخاريِّ.

ج. ارتفاعُ درجةِ الغليانِ.

د. الضغطُ الأسموزيُّ.

5. يحتوي المحلولُ (أ) على 0.1 mol سكروز $C_{12}H_{22}O_{11}$، مذابٍ في 500 g من الماءِ. يحتوي المحلولُ (ب) على 0.1 mol من كلوريدِ الصوديومِ NaCl، في 500 g من الماءِ. أيٌّ من التعبيراتِ التاليةِ حولَ هذه المحاليلِ صحيحٌ؟

أ. لكلا المحلولَينِ الضغطُ البخاريُّ نفسُه.

ب. يغلي المحلولُ (أ) عند درجةِ حرارةٍ أعلى من المحلولِ (ب).

ج. يتجمدُ المحلولُ (أ) عند درجةِ حرارةٍ أعلى من المحلولِ (ب).

د. يغلي المحلولانِ عند درجةِ الحرارةِ نفسِها.

6. الجدولُ التالي يُظهرُ درجاتِ تجمُّدِ محاليلِ المذاباتِ الثلاثةِ X و Y و Z غيرِ المتطايرةِ في الماءِ. (قيمة K_f للماءِ هي $-1.86°C/m$).

المذيب	المذاب (mol)	الماء (g)	درجةُ التجمُّدِ (°C)
X	1.00	1000	−5.58
Y	1.00	1000	−1.86
Z	1.00	1000	−3.72

أيُّ العباراتِ التاليةِ غيرُ صحيحةٍ؟

أ. المذاباتُ الثلاثةُ جميعُها لاإلكتروليتيَّةٌ.

ب. المذابُ X يمكنُ أن يكونَ $Ca(NO_3)_2$.

ج. المذابُ Y يمكنُ أن يكونَ سكروزًا.

د. المذابُ Z يمكنُ أن يكونَ KCl.

7. أيُّ المحاليلِ الموصوفةِ في الجدولِ المبيَّنِ في السؤالِ 6، له درجةُ غليانٍ أعلى؟

أ. محلولُ المذابِ X.

ب. محلولُ المذابِ Y.

ج. محلولُ المذابِ Z.

د. المحاليلُ جميعُها ذاتُ درجةِ غليانٍ واحدةٍ.

مراجعةُ المفاهيم

8. كم مولاً من الأيوناتِ في 1 L من محلولِ KCl، وكم مولاً من الأيوناتِ في 1 L من محلولِ $Mg(NO_3)_2$، إذا كان تركيزُ كلٍّ منهما 1 M؟

9. موظِّفًا الجدول 2-1، توقَّعْ أيُّ المركَّباتِ التاليةِ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ، وأيُّها غيرُ قابلةٍ للذوبانِ:

أ. KCl　　و. $Pb(ClO_3)_2$

ب. $NaNO_3$　　ز. $(NH_4)_2S$

ج. AgCl　　ح. $PbCl_2$ (في ماءٍ بارد)

د. $BaSO_4$　　ط. FeS

هـ. $Ca_3(PO_4)_2$　　ي. $Al_2(SO_4)_3$

10. ما المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ؟

11. أ. ما التأيُّنُ؟

ب. ميِّزْ بين التأيُّنِ والتفكُّكِ.

12. أ. عرِّفِ الإلكتروليتَ القويَّ والإلكتروليتَ الضعيفَ، وميِّزْ بينهما.

ب. هاتِ مثالَينِ على كلِّ نوعٍ.

13. ما الذي يحدِّدُ قوةَ المذابِ كإلكتروليت؟

14. ميِّزْ بين استخدامِ الصفتَيْن «قويٍّ» و«ضعيفٍ» وبين استخدامِ الصفتَيْن «مخفّفٍ» و«مركَّزٍ» عند توصيفِ المحاليلِ الإلكتروليتيَّةِ.

15. كيف يؤثِّرُ مذابٌ غيرُ متطايرٍ على خصائصِ المذيبِ التاليةِ:

أ. الضغطُ البخاريُّ
ب. درجةُ التجمُّدِ
ج. درجةُ الغليانِ
د. الضغطُ الأسموزيُّ

16. أ. ما الذي يسبِّبُ ارتفاعَ مستوى المحلولِ الأكثرِ تركيزًا عندما يُفصَلُ بين محلولَينِ مختلفَي التركيزِ بغشاءٍ شبهِ منفذٍ؟

ب. متى يتوقَّفُ مستوى المحلولِ عن الارتفاعِ؟

ج. عندما يتوقَّفُ مستوى المحلولِ عن الارتفاعِ، ما المحصِّلةُ النهائيَّةُ لحركةِ جزيئاتِ الماءِ عبر الغشاءِ؟

17. أ. قارنْ بين تأثيرِ المذابِ الإلكتروليتيِّ غيرِ المتطايرِ وتأثيرِ المذابِ اللاإلكتروليتيِّ غيرِ المتطايرِ على درجتَيْ تجمُّدِ المذيباتِ وغليانِها.

ب. لماذا يلاحظُ مثلُ هذا الاختلافِ؟

18. لماذا تختلفُ القيمةُ الفعليَّةُ لانخفاضِ درجةِ تجمُّدِ محلولٍ إلكتروليتيٍّ عن قيمةِ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِهِ المحسوبةِ على أساسِ تركيزِ الجسيماتِ؟

مسائل

19. اكتبْ معادلةَ التفكُّكِ في الماءِ لكلٍّ من المركَّباتِ الأيونيَّةِ التاليةِ. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-1)

أ. KI
ب. $NaNO_3$
ج. $MgCl_2$
د. Na_2SO_4

20. حددْ عددَ المولاتِ لكلِّ أيونٍ تنتجُهُ المركَّباتُ في السؤالِ 19، وكذلك العددَ الكلّيَّ لمولاتِ الأيوناتِ التي ينتجُها 1 mol من هذه المركَّباتِ المذابةِ في الماءِ.

21. اكتبْ معادلةَ التفكُّكِ في الماءِ لكلٍّ مما يلي، ثم حدِّدِ العددَ الكلّيَّ لمولاتِ أيوناتِ المذابِ المتكوِّنةِ.

أ. 0.50 mol من نيتراتِ السترونشيوم
ب. 0.50 mol من فوسفاتِ الصوديوم

22. مستخدمًا الجدول 2-1 اكتبِ المعادلةَ الكيميائيَّةَ الموزونةَ، والمعادلةَ الأيونيَّةَ العامَّةَ. حدِّدِ الأيوناتِ المتفرِّجةَ، والراسبَ المتوقَّعَ، ثم اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ لكلٍّ من التفاعلاتِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-2)

أ. $\rightarrow$ (aq)كبريتيد البوتاسيوم + (aq)كلوريد الزئبق (II)
ب. $\rightarrow$ (aq)كلوريد الكالسيوم + (aq)كربونات الصوديوم
ج. $\rightarrow$ (aq)فوسفات الأمونيوم + (aq)كلوريد النحاس (II)

23. حدِّدِ الأيوناتِ المتفرِّجةَ في التفاعلِ بين KCl و $AgNO_3$ في محلولٍ مائيٍّ.

24. يتفاعلُ كلوريدُ النحاسِ (II) ونيتراتُ الرصاصِ (II) في المحاليلِ المائيَّةِ بطريقةِ الاستبدالِ الثنائيِّ. اكتبِ المعادلةَ الكيميائيَّةَ الموزونةَ والمعادلةَ الأيونيَّةَ العامَّةَ والمعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ لهذا التفاعلِ.

25. حددْ قيمةَ الانخفاضِ لدرجةِ تجمُّدِ الماءِ في المحاليلِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-3)

أ. محلول $1.50\ m$ من السكروزِ $C_{12}H_{22}O_{11}$ في الماءِ.
ب. 171 g من $C_{12}H_{22}O_{11}$ في 1.00 kg من الماءِ.
ج. 77.0 g من $C_{12}H_{22}O_{11}$ في 400. g من الماءِ.

26. حدِّدْ مولاليةَ كلِّ محلولٍ يحتوي على لاإلكتروليتٍ مجهولٍ في الماءِ، إذا كان المعطى قيمَ انخفاضِ درجاتِ التجمُّدِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-4)

أ. $-0.930°C$
ب. $-3.72°C$
ج. $-8.37°C$

27. محلولٌ يحتوي على 20.0 g من الجلوكوزِ $C_6H_{12}O_6$ في 250.0 g من الماءِ.

أ. ما قيمةُ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ المذيبِ؟
ب. ما درجةُ تجمُّدِ المحلولِ؟

28. كم جرامًا من المادةِ المضادةِ للتجمُّدِ $C_2H_4(OH)_2$ يلزمُ لكلِّ 500. g من الماءِ لمنعِهِ من التجمُّدِ عند درجةِ حرارةِ $-20.0°C$؟

29. يتجمَّدُ البنزينُ النقيُّ C_6H_6 عند درجةِ حرارة $5.45°C$. فإذا كانت درجةُ تجمُّدِ محلولٍ يحتوي على 7.24 g من $C_2Cl_4H_2$ في 115 g من البنزينِ تساوي $3.55°C$، احسبْ ثابتَ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ للبنزينِ؟

30. إذا أذيبَ 1.500 g من مذابٍ، كتلتُهُ المولية 125.0 g، في 35.00 g من الكافورِ (مادةٌ عطريَّةٌ)، فما درجةُ تجمُّدِ المحلولِ الناتجةُ؟

31. حدِّدْ قيمةَ ارتفاعِ درجةِ غليانِ الماءِ في كلٍّ من المحاليلِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-5)

أ. محلول $2.5\ m$ جلوكوز، $C_6H_{12}O_6$، في الماءِ.

ب. $3.20\ g$ من $C_6H_{12}O_6$ في $1.00\ kg$ من الماءِ.

ج. $20.0\ g$ من $C_{12}H_{22}O_{11}$ (سكروز) في $500.\ g$ من الماءِ.

32. حددْ مولاليَّةَ المحلولِ المائيِّ ذي درجاتِ الغليانِ التاليةِ:

أ. $100.25°C$

ب. $101.53°C$

ج. $102.805°C$

33. حددْ قيمةَ التغيرِ المتوقَّعِ في درجةِ تجمُّدِ محلولٍ مائيٍّ تركيزُهُ $1.00\ m$ في الموادِّ الإلكتروليتيَّةِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-6)

أ. KI

ب. $CaCl_2$

ج. $Ba(NO_3)_2$

34. ما التغيُّرُ المتوقَّعُ في درجةِ تجمُّدِ الماءِ في محلولِ $AlCl_3$ تركيزُهُ $0.015\ m$؟

35. ما درجةُ التجمُّدِ المتوقَّعةُ لمحلولٍ يحتوي على $85.0\ g$ $NaCl$ مذابةٍ في $450.g$ من الماءِ؟

36. حدِّدْ درجةَ الغليانِ المتوقَّعةَ لمحلولٍ ناتجٍ عن إذابةِ $25.0\ g$ من كلوريدِ الباريومِ في $0.150\ kg$ من الماءِ.

37. إذا كان التغيُّرُ في درجةِ غليانِ الماءِ في محلولِ يوديدِ البوتاسيومِ $0.65°C$، فكم يكونُ التركيزُ المولاليُّ ليوديدِ البوتاسيومِ؟

38. إذا كانت درجةُ تجمُّدِ محلولٍ مائيٍّ لنيتراتِ الباريومِ $-2.65°C$، فكم يكونُ التركيزُ المولاليُّ لنيتراتِ الباريومِ؟

39. احسبْ درجةَ التجمُّدِ المتوقَّعةَ لمحلولٍ يحتوي على $1.00\ kg$ من الماءِ و $0.250\ mol\ NaCl$.

40. تشيرُ نتائجُ تجربةٍ حولَ محلولٍ مائيٍّ من MgI_2 تركيزُهُ $1.00\ m$، إلى أن التغيُّرَ الحقيقيَّ في درجةِ تجمُّدِ الماءِ يبلغُ $-4.78°C$. جدْ قيمةَ التغيُّرِ المتوقَّعةِ في درجةِ تجمُّدِ الماءِ. اقترحْ سببًا مناسبًا للاختلافِ بين القيمِ المتوقَّعةِ والمقيسةِ.

مراجعةٌ متنوعة

41. إذا زُوِّدْتَ بالمحاليلِ المائيَّةِ ذاتِ التركيزِ $0.01\ m$ التاليةِ، رتِّبِ المحاليلَ تصاعديًّا وفقًا للزيادةِ في تغيُّرِ درجةِ تجمُّدِها.

أ. NaI ج. K_3PO_4

ب. $CaCl_2$ د. $C_6H_{12}O_6$ (جلوكوز)

42. ما التركيزُ المولاليُّ لمحلولٍ مائيٍّ من كلوريدِ الكالسيومِ الذي يتجمَّدُ عند درجةِ حرارةِ $-2.43°C$؟

43. أ. اكتبِ المعادلةَ الكيميائيَّةَ بالصيغِ الموزونةِ التي تبيِّنُ النواتجَ المتوقَّعةَ لتفاعلِ الاستبدالِ الثنائيِّ بين نيتراتِ الكالسيومِ وكلوريدِ الصوديومِ.

ب. حددْ، مستخدمًا الجدول 2-1، هل يتكوَّنُ راسبٌ أم لا.

ج. هل يحدثُ هذا التفاعلُ؟

44. اكتبْ معادلةً موزونةً لإظهارِ ما يحدثُ عند ذوبانِ بروميدِ الهيدروجينِ وتفاعلِهِ مع الماءِ. أدخِلْ أيونَ الهيدرونيومِ في المعادلةِ.

45. اكتبْ معادلةَ تفكُّكِ كلٍّ مما يلي في الماءِ، ثم حدِّدِ العددَ الكلِّيَّ لمولاتِ أيوناتِ المذابِ المتكوِّنةِ.

أ. $0.275\ mol$ من كبريتيدِ البوتاسيومِ

ب. $0.15\ mol$ من كبريتاتِ الألمنيومِ

46. احسبِ التغيُّرَ المتوقَّعَ في درجةِ غليانِ الماءِ في محلولٍ مكوَّنٍ من $131.2\ g$ من نيتراتِ الفضةِ $AgNO_3$ في $2.00\ kg$ من الماءِ.

47. حمضُ النيتروزِ، HNO_2، إلكتروليتٌ ضعيفٌ، بينما حمضُ النيتريكِ، HNO_3، إلكتروليتٌ قويٌّ. اكتبْ معادلةً تمثِّلُ تأيُّنَ كلٍّ منهما في الماءِ. ضمِّنِ المعادلةَ أيونَ الهيدرونيومِ مع تحديدِ نوعِ السهمِ الأنسبِ في كلِّ معادلةٍ.

48. احسبْ درجةَ غليانِ محلولٍ مائيٍّ يحتوي على مركَّبٍ لاإلكتروليتيٍّ يتجمَّدُ عند درجةِ حرارةِ $-6.51°C$.

49. اكتبْ معادلةً موزونةً لتفكُّكِ كربوناتِ الصوديومِ، Na_2CO_3، في الماءِ. احسبْ عددَ مولاتِ كلِّ أيونٍ ينتجُ عند ذوبانِ $0.20\ mol$ من كربوناتِ الصوديومِ، ثم احسبِ العددَ الكلِّيَّ لمولاتِ الأيوناتِ.

50. وظِّفِ المعلوماتِ الواردةَ في الجدولِ 2-1، واكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ للتفاعلِ التالي:

فوسفاتُ البوتاسيومِ(aq) + نيتراتُ الرصاصِ(II)(aq)

51. احسبْ درجةَ التجمُّدِ المتوقَّعةَ لمحلولٍ مائيٍّ يحتوي على $268\ g$ من نيتراتِ الألمنيومِ $Al(NO_3)_3$ في $8.50\ kg$ من الماءِ.

تفكيرٌ ناقد

52. نماذجُ تطبيقية

أ. تصورْ أنك تجري تجربةً عمليَّةً لتحديدِ درجةِ تجمُّدٍ، مستخدمًا محلولاً مائيًّا لـ KNO_3، وكانت درجة التجمُّدِ المقيسةُ للمحلول $-1.15°C$. وباستخدام عيّنة ماءٍ نقيٍّ سجَّلَ الترمومترُ نفسُهُ $0.25°C$ كدرجةِ تجمُّدٍ لهذه العيّنة. حدِّدِ التركيزَ المولاليَّ لـ KNO_3، مفترضًا عدمَ وجودِ قوى تجاذبٍ بين الأيونات.

ب. أنتَ غيرُ مقتنعٍ بالنتائجِ في الخطوةِ (أ) لأنك لا تعتقدُ بصوابِ إهمالِ تأثيرِ التجاذبِ الأيونيِّ. فقرَّرتَ أخذَ عيّنةٍ من المحلولِ حجمُها $10.00\ mL$. وبعد تبخيرِ الماءِ من المحلولِ حصلْتَ على $0.415\ g$ من KNO_3. حدِّدِ التركيزَ المولاليَّ الحقيقيَّ لـ KNO_3 والنسبةَ المئويَّةَ للاختلافِ بين التركيزِ المقيس لدى تحديدِ درجةِ التجمُّدِ والتركيزِ الحقيقيِّ لـ KNO_3، مفترضًا أن كثافةَ المحلول $1.00 g/mL$.

53. تحليلُ معلومات: يكونُ أحيانًا انخفاضُ درجةِ التجمُّدِ المقيسةِ لمحاليل إلكتروليت أقلَّ من القيمةِ المحسوبة. لماذا؟ أين يكونُ الفرقُ أكبرَ: في المحاليلِ المركَّزةِ أم في المحاليلِ المخفَّفة؟

بحثٌ وكتابة

54. اكتبْ تقريرًا علميًّا لتقدير كمّيَّةِ الملح التي ترشُّها مدينةٌ في منطقةٍ باردةٍ على طرقِها في فصلِ الشتاءِ. ما المشاكلُ البيئيَّةُ التي تنشأُ عن هذا الاستخدامِ للملح؟ ما بدائلُ الملحِ التي يمكنُ استخدامُها لانصهارِ الجليدِ والثلج؟

55. اكتب تقريرًا علميًّا عن دورِ الإلكتروليتاتِ والمحاليلِ الإلكتروليتيَّةِ الموجودةِ في جسمِك. وضمِّنْ تقريرَكَ وظيفةَ الإلكتروليتاتِ في فاعليَّةِ الأعصابِ والعضلاتِ. ما المشاكلُ الصحيَّةُ التي يمكنُ أن تنشأَ عن اختلالِ اتزانِ الإلكتروليتاتِ في سوائلِ الجسم؟

56. اكتبْ تقريرًا علميًّا عن توظيفِ عمليةِ التناضحِ العكسيِّ في الحصولِ على الماءِ العذبِ، وقارنْ بين هذه الطريقةِ والأساليبِ الأخرى المتبعةِ في تحليةِ المياهِ.

تقويمٌ بديل

57. أداء: استخدمْ بطاريةً جافةً ذاتَ جهدٍ منخفضٍ لتجميعِ جهازِ توصيلٍ. اطلبْ من المعلمِ عددًا من المحاليلِ المائيَّةِ غيرِ معروفةِ المكوِّناتِ وذاتِ المولاليَّةِ نفسِها. واستخدمِ الجهازَ للتمييزِ بين الإلكتروليتِ واللاإلكتروليتِ، وصنِّفِ المحاليلَ بحسبِ قدرتِها النسبيَّةِ على توصيلِ الكهرباءِ، من الأضعفِ إلى الأقوى. ثمَّ اكتبْ تقريرًا عن النتائجِ التي توصَّلْتَ إليها.

مشروعٌ علمي

58. نفِّذْ مشروعًا علميًّا بعنوانِ «استقصاءُ تأثيرِ تركيزِ المذابِ في درجاتِ غليانِ المحاليلِ الإلكتروليتيَّةِ واللاإلكتروليتيَّةِ».

الفصـــل 3

الأحماضُ والقواعدُ

أغذيةٌ حمضيَّةُ الوسطِ

القســـم 1-3

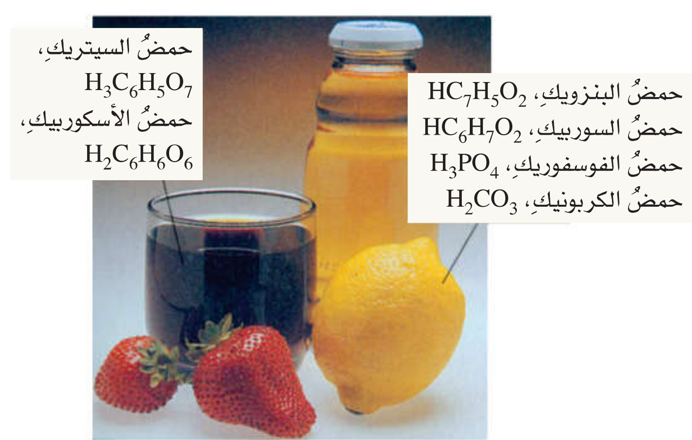
خصائصُ الأحماضِ والقواعدِ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يذكرُ الخصائصَ العامَّةَ لمحاليلِ الأحماضِ والقواعدِ المائيَّةِ.
- يسمّي بعضَ الأحماضِ الثنائيَّةِ الشائعةِ، وبعضَ الأحماضِ الأكسجينيَّةِ اعتمادًا على صيغِها الكيميائيَّةِ.
- يذكرُ خمسةَ أحماضٍ شائعةِ الاستعمالِ في الصناعةِ والمختبرِ، ويقدِّمُ خاصَّتَيْنِ لكلٍّ منها.
- يعرِّفُ الحمضَ والقاعدةَ وفقًا لنظريَّةِ أرهينيوس للتأيُّنِ.
- يقارنُ بينَ الأحماضِ والقواعدِ القويَّةِ والضعيفةِ.

كم من الأطعمةِ يعودُ الفضلُ في مذاقِها الحامضيِّ إلى الحمضِ الذي تحتوي عليهِ! مثل الأطعمةِ التي تظهرُ في الشكل 3-1أ. فاللبنُ الحامضُ يحتوي على حمضِ اللاكتيكِ. والخلُّ الذي يمكنُ إنتاجُهُ بتخميرِ عصيرِ الفواكهِ يحتوي على حمضِ الأسيتيكِ. كذلك يُكسِبُ حمضُ الفوسفوريك بعضَ المشروباتِ الغازيَّةِ نكهةً حامضيَّةً. والفواكهُ في معظمِها تحتوي على أنواعٍ من الأحماضِ. فالليمونُ والبرتقالُ والجريب فروت وغيرُها من الحمضيّاتِ تحتوي جميعُها على حمضِ السيتريكِ، والتفّاحُ يحتوي على حمضِ الماليكِ (حمضِ التفّاحِ)، وعصيرُ العنبِ يحتوي على حمضِ الطرطريكِ.

وهناك موادُّ كثيرةٌ معروفةٌ بخصائصِها القاعديَّةِ، وتعتبرُ جزءًا من الحاجاتِ المنزليَّةِ، كتلك التي تظهرُ في الشكل 3-1ب. فالأمونيا المستخدمةُ في المنازل محلولٌ مائيٌّ لغازِ الأمونيا يظهرُ فاعليَّةً فائقةً في عمليّاتِ التنظيفِ العامَّةِ. كذلك يعتبرُ هيدروكسيدُ الصوديوم، $NaOH$، واحدًا من مكوِّناتِ بعضِ المنظِّفاتِ. وحليبُ المغنيسيا معلَّقٌ مائيٌّ لهيدروكسيدِ المغنيسيوم، $Mg(OH)_2$، الذي لا يتَّصفُ بقابليَّةٍ جيدةٍ للذوبانِ في الماءِ، وهو مضادٌّ للحموضةِ يُستعملُ لإزالةِ الإفرازاتِ الزائدةِ من حمضِ الهيدروكلوريكِ في المعدةِ. كذلك تجدرُ الإشارةُ إلى أن هيدروكسيدَ الألمنيوم، $Al(OH)_3$ وكربوناتِ الصوديوم الهيدروجينيَّةَ $NaHCO_3$ هما أيضًا قاعدتانِ تتوفّرانِ، عادةً في مضاداتِ الحموضةِ.



(أ)

(ب)

الشكل 3-1 (أ) تحتوي الفواكهُ وعصيرُ الفواكهِ على بعضِ أنواعِ الأحماضِ، كحمضِ السيتريكِ وحمضِ الأسكوربيكِ. والمشروباتُ الغازيَّةُ تحتوي على حمضِ الفوسفوريكِ وحمضِ البنزويكِ وحمضِ الكربونيكِ. (ب) تحتوي الكثيرُ من موادِّ التنظيفِ المنزليَّةِ على قواعدَ كالأمونيا وهيدروكسيدِ الصوديوم، كذلك تحتوي مضاداتُ الحموضةِ أيضًا على قواعدَ مثل هيدروكسيدِ الألمنيوم.

الشكل 3-2 شريطٌ من ورقِ الكاشفِ يتحوَّلُ إلى اللونِ الأحمرِ عندما يغمسُ في الخلِّ، ويبيِّنُ ذلك أنَ الخلَّ حمضٌ.

الأحماضُ

عُرفتِ الأحماضُ بدايةً بصفتِها فئةً مميَّزةً من المركّباتِ تجمعُ بين محاليلِها المائيَّةِ خصائصُ مشتركةٌ، وهي:

1. *المحاليلُ المائيَّةُ للأحماضِ لها مذاقٌ حامضٌ.* لكن التذوُّقَ يجبُ ألاّ يُستخدمَ قطعيًّا كوسيلةِ اختبارٍ لأيِّ مادةٍ كيميائيَّةٍ. فكثيرٌ من الأحماضِ، خصوصًا ما كانَ منها في المحاليلِ المركَّزةِ، موادٌّ أكّالةٌ تتلفُ أنسجةَ الجسمِ والملابسِ، وكثيرٌ منها موادٌّ سامَّةٌ.
2. *الأحماضُ تغيِّرُ ألوانَ الكواشفِ.* تُستخدمُ أوراقُ pH ككواشفَ، فيتحوَّلُ لونُها عند غمسِها في محلولٍ حمضيٍّ، كما في الشكل 3-2.
3. *بعضُ الأحماضِ تتفاعلُ مع الفلزّاتِ النشيطةِ، وتطلقُ غازَ الهيدروجين H_2.* تذكَّرْ هنا أن الفلزّاتِ يمكنُ ترتيبُها في سلسلةِ النشاطيَّةِ، بحسبِ نشاطِها. وبناءً على ذلك تخضعُ الفلزّاتُ الواقعةُ فوق الهيدروجين لتفاعلِ الاستبدالِ الأحاديِّ، عندما تتفاعلُ مع بعضِ الأحماضِ، لتنتجَ غازَ الهيدروجين، كما في التفاعلِ بينَ فلزِّ الباريومِ وحمضِ الكبريتيكِ المخفّفِ:

$$Ba(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow BaSO_4(s) + H_2(g)$$

4. *تتفاعلُ الأحماضُ مع القواعدِ لتنتجَ الأملاحَ والماءَ.* عندما تتفاعلُ كمّيّاتٌ متعادلةٌ كيميائيًّا من الأحماضِ والقواعدِ تختفي الخصائصُ الثلاثُ السابقةُ، لأن الحمضَ قد تعادلَ في نهايةِ التفاعلِ. ينتجُ عن هذا التفاعلِ الماءُ ومركَّبٌ أيونيٌّ هو الملحُ.
5. *المحاليلُ المائيَّةُ للأحماضِ موصِّلةٌ للتيارِ الكهربائيِّ.* ولأن بعضَ الأحماضِ تُنتِجُ في محاليلِها المائيةِ أيوناتٍ كثيرةً، فهي إلكتروليتاتٌ قويَّةٌ. أما الأحماضُ التي تنتجُ القليلَ من الأيوناتِ فهي إلكتروليتاتٌ ضعيفةٌ.

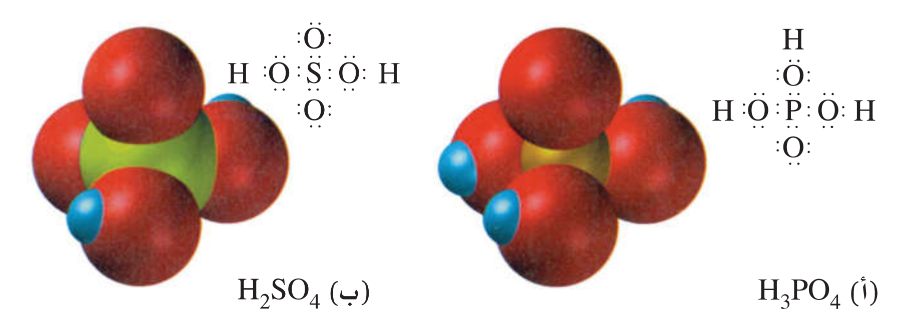
تسميةُ الأحماضِ

الحمضُ الثنائيُّ binary acid ***حمضٌ يحتوي فقط على عنصرَيْنِ مختلفَيْنِ، هما الهيدروجينُ وعنصرٌ آخرُ أكثرُ سالبيةً كهربائيَّةً.*** وإن الكثيرَ من الأحماضِ غيرِ العضويَّةِ الشائعةِ هي أحماضٌ ثنائيَّةٌ، مثلُ هاليداتِ الهيدروجينِ، HF، HCl، HBr، HI.

والطريقةُ المستخدمةُ لتسميةِ الأحماضِ الثنائيَّةِ موضَّحةٌ بالأمثلةِ الواردةِ في الجدولِ 3-1. الأحماضُ المذكورةُ في هذا الجدولِ هي في الواقعِ غازاتٌ حين تكونُ في حالتِها النقيَّةِ. لكن محاليلَها المائيَّةَ هي التي تُعرفُ بأسماءِ الأحماضِ. ويلخِّصُ الجدولُ تسميةَ المركَّباتِ الثنائيَّةِ كما يلي:

الجدولُ 3-1 أسماءُ الأحماضِ الثنائيَّةِ

الصيغة	اسمُ الحمض
HF	حمضُ الهيدروفلوريك
HCl	حمضُ الهيدروكلوريك
HBr	حمضُ الهيدروبروميك
HI	حمضُ الهيدرويوديك
H_2S	حمضُ الهيدروكبريتيك



الشكل 3-3 (أ) تركيبُ حمضِ الفوسفوريكِ. (ب) تركيبُ حمضِ الكبريتيكِ.

تسميةُ الأحماضِ الثنائيَّةِ

1. يبدأُ اسمُ الحمضِ الثنائيِّ بالبادئةِ هيدرو-.
2. يتبعُ البادئةَ جذرُ اسمِ العنصرِ الثاني.
3. ينتهي الاسمُ باللاحقةِ -يك.

الحمضُ الأكسجينيُّ oxyacid ***حمضٌ يتكوَّنُ من الهيدروجينِ والأكسجينِ وعنصرٍ ثالثٍ لافلزيٍّ في الغالبِ.*** فحمضُ النيتريكِ، HNO_3، حمضٌ أكسجينيٌّ. ويُظهرُ الشكلُ 3-3 تركيبَ نوعَيْنِ آخرَيْنِ من الأحماضِ الأكسجينيَّةِ وبالتالي فإن الأحماضَ الأكسجينيَّةَ هي فئةٌ من الأحماضِ المكوَّنةِ من ثلاثةِ عناصرَ مختلفةٍ. أما الصيغُ الكيميائيَّةُ لهذه الأحماضِ فتبدأُ بذرّةِ هيدروجينٍ أو أكثرَ يليها أنيونٌ متعدِّدُ الذرّاتِ. وفي هذه الأحماضِ ترتبطُ ذرّاتُ الهيدروجينِ بذرّاتِ الأكسجينِ، كما هو ظاهرٌ في تركيبِ الأحماضِ المبيّنةِ في الشكلِ 3-3. وأسماءُ أنيوناتِ هذه الأحماضِ تُشتقُّ من أسماءِ الأحماضِ المناظرةِ، كما يظهرُ من الجدولِ 3-2 الذي يقدِّمُ بعضَ الأحماضِ الأكسجينيَّةِ الشائعةِ.

الجدولُ 3-2 أسماءُ بعضِ الأحماضِ الأكسجينيَّةِ الشائعةِ وأسماءُ أنيوناتِها الأكسجينيَّةِ

الصيغة	اسمُ الحمضِ	اسمُ الأنيونِ
CH_3COOH	الحمضُ الأسيتي (حمض الأسيتيك)	CH_3COO^-، أسيتاتٌ
H_2CO_3	حمضُ الكربونيكِ	CO_3^{2-}، كربوناتٌ
HIO_3	حمضُ اليوديكِ	IO_3^-، يوداتٌ
$HClO$	حمضُ الهيبوكلوروز	ClO^-، هيبوكلوريتٌ
$HClO_2$	حمضُ الكلوروز	ClO_2^-، كلوريتٌ
$HClO_3$	حمضُ الكلوريكِ	ClO_3^-، كلوراتٌ
$HClO_4$	حمضُ البيركلوريكِ	ClO_4^-، بيركلوراتٌ
HNO_2	حمضُ النيتروز	NO_2^-، نيتريتٌ
HNO_3	حمضُ النيتريكِ	NO_3^-، نيتراتٌ
H_3PO_3	حمضُ الفوسفوروز	PO_3^{3-}، فوسفيتٌ
H_3PO_4	حمضُ الفوسفوريكِ	PO_4^{3-}، فوسفاتٌ
H_2SO_3	حمضُ الكبريتوز	SO_3^{2-}، كبريتيتٌ
H_2SO_4	حمضُ الكبريتيكِ	SO_4^{2-}، كبريتاتٌ

بعضُ الأحماضِ الصناعيَّةِ الشائعةِ

للأحماضِ خصائصُ تجعلُ منها كيميائيّاتٍ مهمَّةً في المجالِ الصناعيِّ وفي المختبراتِ. فأحماضُ الكبريتيكِ والنيتريكِ والفوسفوريكِ والهيدروكلوريكِ وحمضُ الأسيتيكِ كلُّها أحماضٌ شائعةٌ في الصناعةِ.

حمضُ الكبريتيكِ

حمضُ الكبريتيكِ هو المادةُ الكيميائيَّةُ الصناعيَّةُ الأكثرُ إنتاجًا على الصعيدِ العالميِّ. إذ يتمُّ إنتاجُ أكثرَ من 165 مليونَ طنٍّ من هذه المادةِ سنويًّا في أنحاءِ العالمِ كافَّةً. هذا الحمضُ يُستخدَمُ بكمّيّاتٍ كبيرةٍ في محطّاتِ تكريرِ البترولِ، وفي مصانعِ التعدينِ، وكذلك في صناعةِ الأسمدةِ. وهو أيضًا أساسٌ لعددٍ كبيرٍ من العمليّاتِ الصناعيَّةِ بما فيها إنتاجُ المعادنِ، وصناعةُ الورقِ والدهاناتِ والأصباغِ والمنظِّفاتِ، وصناعةُ الكثيرِ من الموادِّ الخامِ الكيميائيَّةِ. ويُستعملُ حمضُ الكبريتيكِ في بَطاريّاتِ السيّاراتِ.

وبفضلِ تمتُّعِهِ بقابليَّةِ امتصاصِ الماءِ، يعتبرُ حمضُ الكبريتيكِ المركَّزُ مزيلاً فعّالاً للماءِ. لذلك، يمكنُ استعمالُهُ لإزالةِ الماءِ من الغازاتِ التي لا تتفاعلُ معه، ومن السكَّرِ وغيرِهِ من الموادِّ العضويَّةِ. وبما أن الجلدَ يحتوي على مركَّباتٍ عضويَّةٍ، فإن حمضَ الكبريتيكِ المركَّزَ بتفاعلِهِ مع هذه المركّباتِ يمكنُه أن يسبّبَ حروقًا خطرةً.

حمضُ النيتريكِ

إن حمضَ النيتريكِ، في حالتِه النقيَّةِ، سائلٌ متطايرٌ وغيرُ مستقرٍّ. لكنه يصبحُ أكثرَ استقرارًا عندَ إذابتِهِ في الماءِ. وللمحاليلِ المائيَّةِ لحمضِ النيتريكِ استخداماتٌ واسعةٌ في الصناعةِ. يُكسبُ هذا الحمضُ البروتيناتِ لونًا أصفر، في الشكل 3-4 تبدو ريشةُ طيرٍ مصطبغةً بلونٍ أصفرَ نتيجةً لغمسِها في محلولِ هذا الحمضِ. وتسببُ رائحةُ حمضِ النيتريكِ الشعورَ بالاختناقِ. ويتركُ حمضُ النيتريكِ بقعًا على الجلدِ، ويحدثُ حروقًا

الشكل 3-4 حمضُ النيتريكِ المركَّزُ يصبغُ الريشةَ بلونٍ أصفرَ.

خطرةً. يُستعملُ حمضُ النيتريكِ في صناعةِ المتفجِّراتِ التي تُعدُّ في كثيرٍ من أنواعِها مركَّباتٍ نيتروجينيَّةً. كذلك يُستخدَمُ في صناعةِ المطّاطِ والموادِّ البلاستيكيَّةِ والأصباغِ والمستحضراتِ الصيدلانيَّةِ. ويكونُ محلولُ حمضِ النيتريكِ في البدايةِ عديمَ اللونِ، لكنَّه يكتسبُ بمرورِ الزمنِ لونًا أصفرَ ينتجُ عن تفكُّكِ القليلِ من الحمضِ وتحوُّلِهِ إلى ثاني أكسيدِ النيتروجينِ ذي اللونِ البنّيِّ.

حمضُ الفوسفوريكِ

تستخدَمُ معظمُ كمِّيّاتِ حمضِ الفوسفوريكِ التي تنتجُ كلَّ سنةٍ في صناعةِ الأسمدةِ وعلفِ الحيواناتِ. ويكتسبُ محلولُ حمضِ الفوسفوريكِ المخفَّفُ مذاقًا حامضيًّا لكنَّهُ غيرُ سامٍّ. ويُستخدمُ هذا الحمضُ المخفَّفُ كعاملٍ منكِّهٍ للمشروباتِ وكعاملِ تنظيفٍ لمعدّاتِ مصانعِ الألبانِ. ويلعبُ حمضُ الفوسفوريكِ دورًا مهمًّا في صناعةِ المنظِّفاتِ والسيراميكِ.

حمضُ الهيدروكلوريكِ

تفرزُ معدةُ الإنسانِ حمضَ الهيدروكلوريكِ ليساعدَ في عمليةِ الهضمِ. وصناعيًّا يكتسبُ حمضُ الهيدروكلوريكِ أهمّيَّةً خاصَّةً في عملياتِ تنظيفِ أسطحِ الحديدِ والفولاذِ. إذ يُغمَسُ المعدنُ المرادُ تنظيفُهُ في محلولِ حمضِ الهيدروكلوريكِ لإزالةِ الشوائبِ من أسطحِهِ. ويستخدمُ هذا الحمضُ في الصناعةِ كمنظِّفٍ، وفي تصنيعِ الموادِّ الغذائيَّةِ، وفي استخلاصِ المغنيسيومِ من مياهِ البحرِ، وفي إنتاجِ العديدِ من الكيميائيّاتِ.

ويستخدمُ المحلولُ المركَّزُ لحمضِ الهيدروكلوريكِ في المحافظةِ على درجةِ الحموضةِ الصحيحةِ لمياهِ المسابحِ، وكذلك في تنظيفِ المباني.

الحمضُ الأسيتي (حمض الأسيتيك)

الحمضُ الأسيتي (حمضُ الأسيتيك) النقيُّ سائلٌ صافٍ عديمُ اللونِ، له رائحةٌ حادَّةٌ، ويعرفُ بالحمضُ الأسيتي (حمضُ الأسيتيك) الثلجيِّ. هذا الاسمُ يأتي من كونِ الحمضُ الأسيتي (حمضُ الأسيتيك) النقيِّ يتجمَّدُ عندَ درجةِ حرارةِ 17°C، ويشكِّلُ بلَّوراتٍ في الأوساطِ الباردةِ. ويُصنعُ الخلُّ الذي يحتوي على الحمضُ الأسيتي (حمضُ الأسيتيك) عن طريقِ تخميرِ بعضِ النباتاتِ. ويحتوي الخلُّ الأبيضُ على نسبةِ 4% إلى 8% من الحمضُ الأسيتي (حمضُ الأسيتيك).

يعتبرُ الحمضُ الأسيتي (حمضُ الأسيتيك) مادَّةً صناعيةً مهمَّةً، خاصَّةً في مجالِ تحضيرِ الكيميائيّاتِ المستعملةِ في صناعةِ البلاستيكِ. ويجري استخدامُهُ أيضًا كمبيدٍ للفطريّاتِ.

الشكل 3-5 يتحوَّلُ لونُ ورقةِ pH إلى أزرقَ إذا غُمِستْ في محلولِ هيدروكسيدِ الصوديوم.

القواعدُ

ما الفرقُ بين الأحماضِ والقواعدِ؟ تستطيعُ أن تجيبَ عن هذا السؤالِ بالمقارنةِ بينَ خصائصِ الأحماضِ والخصائصِ التاليةِ للقواعدِ.

1. *تمتازُ المحاليلُ المائيَّةُ للقواعدِ بمذاقٍ مرٍّ.* غيرَ أنه يجب ألا يلجأ أحدٌ أبدًا إلى التذوُّقِ للكشفِ عن الصفةِ القاعديَّةِ لأيِّ مادَّةٍ. فكثيرٌ من القواعدِ موادُّ لاذعةٌ تؤذي الجلدَ والأنسجةَ وتسبِّبُ فيها حروقًا خطرةً.

نشاط عملي سريع

الأحماضُ والقواعدُ المنزليّةُ

ضعِ النظارةَ الواقيةَ والبسِ القفّازاتِ والمريول

المواد

- سائلٌ منظِّفٌ للأواني، مسحوقُ تنظيفٍ للأواني، مادةُ تنظيفٍ للثيابِ، مزيلٌ للبقعِ، مليّنٌ صناعيٌّ للأقمشةِ، مبيِّضٌ للثيابِ
- مايونيزٌ، مسحوقُ الخبيزِ، صودا الخبيزِ، خلٌّ أبيضُ، خلُّ التفاحِ، عصيرُ الليمونِ، شرابٌ مرطِّبٌ، مياهٌ معدنيَّةٌ، حليبٌ
- أوراقٌ طازجةٌ من الملفوفِ الأحمرِ
- سخّانٌ كهربائيٌّ
- كأسٌ سعةُ 500 mL
- كأسٌ سعةُ 50 mL
- ملعقةٌ
- ماءُ صنبورٍ
- ملقَطٌ

الملفوفُ الأحمرُ الذي يحتوي على صبغِ الأنتوسيانين يمكنُ استخدامُهُ لصنعِ كاشفِ حمضٍ–قاعدةٍ.

السؤالُ

أيُّ الموادِّ المنزليَّةِ أحماضٌ وأيُّها قواعدُ؟

الطريقةُ

سجِّلْ كلّ نتائجِك في جدولِ بياناتٍ.

1. يمكنُ استعمالُ العصيرِ المستخرجِ من أوراقِ الملفوفِ الأحمرِ لصنعِ كاشفِ حمضٍ–قاعدةٍ. قطِّعْ أوّلاً أوراقَ الملفوفِ الأحمرِ وضعْها في كأسٍ كبيرةٍ. ثم اسكبْ في الكأسِ ماءً حتى يمتلئَ نصفُها. بعد ذلك سخّنِ المزيجَ إلى درجةِ الغليانِ. دعِ المزيجَ يبردْ واسكبِ العصيرَ واحفظْهُ لتحصُلَ على محلولٍ يمكنُ استخدامُهُ ككاشفِ حمضٍ–قاعدةٍ.
2. اجمعْ بعضَ الأطعمةِ والمشروباتِ وبعضَ موادِّ التنظيفِ المرادِ اختبارُها.
3. إذا كانَتِ المادةُ المرادُ اختبارُها مادةً سائلةً، اسكبْ 5 mL منها في كأسٍ صغيرةٍ. أما إذا كانَتْ صلبةً فضعْ كمّيّةً صغيرةً منها في كأسٍ، وأضفْ إليها 5 mL من الماءِ.
4. أضفْ قطرةً أو قطرتَيْنِ من عصيرِ الملفوفِ الأحمرِ (الكاشفِ) إلى المحلولِ المرادِ اختبارُه، ولاحظِ اللونَ. فإذا اكتسبَ المحلولُ لونًا أحمرَ يكونُ حمضيًّا، أما إذا اكتسبَ لونًا أخضرَ فيكونُ قاعديًّا.

المناقشةُ

1. هل موادُّ التنظيفِ أحماضٌ أم قواعدُ، أم غيرُ ذلك؟
2. ما الميزاتُ الحمضيَّةُ والقاعديَّةُ للمشروباتِ والموادِّ الغذائيَّةِ؟
3. هل لاحظتَ على المنتجاتِ الحمضيَّةِ أو القاعديَّةِ وجودَ ملصقِ تحذيرٍ؟

2. *تغيِّرُ محاليلُ القواعدِ ألوانَ الكواشفِ*. وكما يظهرُ في الشكل 3-5 تكتسبُ الكواشفُ في المحاليلِ القاعديَّةِ ألوانًا تختلفُ تمامًا عن الألوانِ التي تكتسبُها في المحاليلِ الحمضيَّةِ.
3. *تتميَّزُ المحاليلُ المائيَّةُ المخفَّفةُ للقواعدِ بأنها ذاتُ ملمسٍ صابونيٍّ*.
4. *تتفاعلُ القواعدُ مع الأحماضِ فتنتجُ الأملاحَ والماءَ*. تختفي خصائصُ القاعدةِ عندَ إضافةِ كمّيّةٍ مكافئةٍ من الحمضِ. يمكنُ القولُ إن «تعادلَ» القاعدةِ يحدثُ عندَما تتفاعلُ هاتانِ المادّتانِ لتنتجا ملحًا وماءً.
5. *محاليلُ القواعدِ توصلُ التيارَ الكهربائيَّ*. وكما في حالةِ الأحماضِ، تكوِّنُ القواعدُ أيوناتٍ في المحاليلِ المائيَّةِ، فهي إذن إلكتروليتاتٌ.

أحماضُ وقواعدُ أرهينيوسَ

أدركَ سفانت أرهينيوس، الكيميائيُّ السويديُّ (1859-1927) أن المحاليلَ المائيَّةَ للأحماضِ والقواعدِ هي موصِّلاتٌ جيدةٌ للتيّارِ الكهربائيِّ. فاستنتجَ أن الأحماضَ والقواعدَ تنتجانِ، بالضرورةِ، الأيوناتِ في المحاليلِ. **حمضُ أرهينيوسَ Arrhenius acid** ***مركَّبٌ كيميائيٌّ يزيدُ من تركيزِ أيونِ الهيدروجينِ H^+ في المحلولِ المائيِّ.*** بتعبيرٍ آخرَ، يتأيَّنُ الحمضُ في المحلولِ ويزيدُ بذلك عددُ أيوناتِ الهيدروجينِ الموجودةِ فيه أصلاً. أما **قاعدةُ أرهينيوسَ Arrhenius base** ***فهي مادةٌ تزيدُ من تركيزِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ OH^- في المحلولِ المائيِّ.*** وبعضُ القواعدِ هي هيدروكسيداتٌ أيونيةٌ تتفكَّكُ في المحلولِ لتنتجَ فيه أيوناتِ الهيدروكسيدِ.

المحاليلُ المائيَّةُ للأحماضِ

إن الأحماضَ المعروفةَ باسمِ أحماضِ أرهينيوس هي مركَّباتٌ جزيئيَّةٌ تحتوي على ذرّاتِ الهيدروجينِ القابلةِ للتأيُّنِ. وجميعُ الأحماضِ القابلةِ للذوبانِ في الماءِ هي إلكتروليتاتٌ.

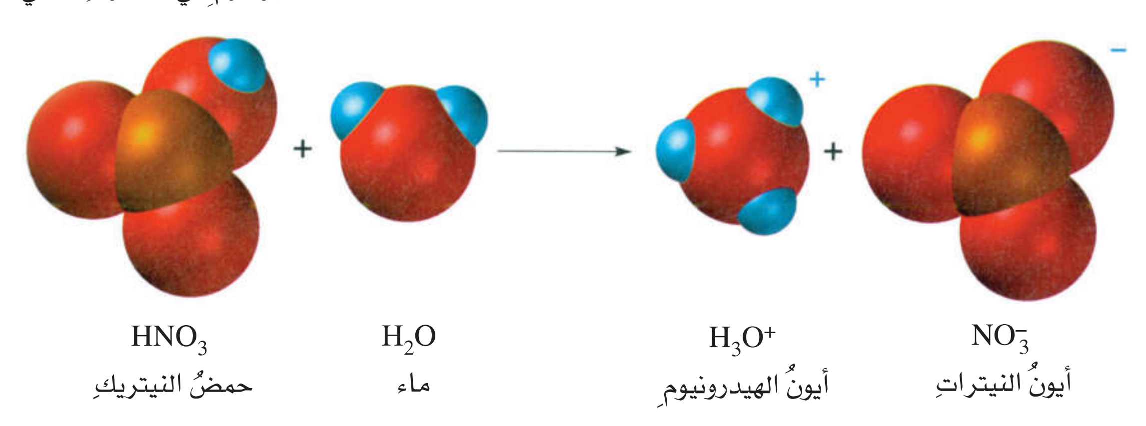
ولأن جزيئاتِ الأحماضِ تتميَّزُ بقطبيَّةٍ كافيةٍ، فإن جزيئاتِ الماءِ تجذبُ منها أيونًا واحدًا، أو أكثرَ، من أيوناتِ الهيدروجينِ، مخلِّفةً بذلك الأنيوناتِ التي تحملُ الشحناتِ السالبةَ. يتمثَّلُ أيون الهيدروجينِ في المحلولِ المائيِّ، كما تمَّ شرحُهُ في السابقِ، بأيونِ الهيدرونيوم H_3O^+. ويظهرُ ذلك في المعادلةِ الكيميائيَّةِ التاليةِ التي تبيِّنُ تأيُّنَ جزيئاتِ حمضِ النيتريكِ HNO_3. ويبيِّنُ الشكل 3-6 أيضًا كيفيَّةَ تكوُّنِ أيونِ الهيدرونيوم عندَما يتفاعلُ حمضُ النيتريكِ مع الماءِ.

$$HNO_3(l) + H_2O(l) \longrightarrow H_3O^+(aq) + NO_3^-(aq)$$

وبشكلٍ مماثلٍ، يمكنُ أن يوضَّحَ تأيُّنُ جزيئاتِ كلوريدِ الهيدروجينِ في الماءِ بالمعادلةِ التاليةِ:

$$HCl(g) + H_2O(l) \longrightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

الشكل 3-6 تشكِّلُ ملاحظاتُ أرهينيوسَ أساسًا لتعريفِ الأحماضِ. فحمضُ أرهينيوسَ، كحمضِ النيتريكِ المبيّنِ في الشكلِ، يُنتجُ أيوناتِ الهيدرونيومِ في المحلولِ المائيِّ.



HNO_3 حمضُ النيتريكِ — H_2O ماء — H_3O^+ أيونُ الهيدرونيومِ — NO_3^- أيونُ النيتراتِ

الجدولُ 3-3 أحماضٌ شائعةٌ

أحماضٌ ضعيفةٌ		أحماضٌ قويَّةٌ	
$HSO_4^- + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + SO_4^{2-}$	$HI + H_2O$	$\rightarrow H_3O^+ + I^-$
$H_3PO_4 + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + H_2PO_4^-$	$HClO_4 + H_2O$	$\rightarrow H_3O^+ + ClO_4^-$
$HF + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + F^-$	$HBr + H_2O$	$\rightarrow H_3O^+ + Br^-$
$CH_3COOH + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + CH_3COO^-$	$HCl + H_2O$	$\rightarrow H_3O^+ + Cl^-$
$H_2CO_3 + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + HCO_3^-$	$H_2SO_4 + H_2O$	$\rightarrow H_3O^+ + HSO_4^-$
$H_2S + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + HS^-$	$HClO_3 + H_2O$	$\rightarrow H_3O^+ + ClO_3^-$
$HCN + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + CN^-$		
$HCO_3^- + H_2O$	$\leftrightarrows H_3O^+ + CO_3^{2-}$		

قوّةُ الأحماضِ

الحمضُ القويُّ* strong acid *هو الحمضُ الذي يتأيَّنُ بشكلٍ تامٍّ في المحلولِ المائيِّ. ويعتبرُ بالتالي إلكتروليتًا قويًّا، فأحماضُ البيركلوريكِ $HClO_4$ والهيدروكلوريكِ HCl وكذلك النيتريكِ HNO_3 هي أمثلةٌ على الأحماضِ القويَّةِ. وهذا يعني أن جزيئاتِ هذه الأحماضِ تتأيَّنُ في الماءِ 100%. وقوّةُ الحمضِ هذه تعتمدُ على قطبيَّةِ الرابطةِ بينَ الهيدروجينِ والعنصرِ المرتبطِ بهِ، وكذلك على السهولةِ التي يتمُّ بها كسرُ هذه الرابطةِ. بحيثُ تزيدُ قوّةُ الحمضِ إذا زادَتْ قطبيَّةُ الرابطةِ وانخفضَتْ طاقتُها.

أما الحمضُ الضعيفُ* weak acid *فهو الذي يُنتجُ القليلَ من أيوناتِ الهيدروجينِ في المحلولِ المائيِّ. ويحتوي محلولُ هذا الحمضِ على أيوناتِ الهيدرونيومِ، وعلى الأنيوناتِ وكذلك على جزيئاتِ الحمضِ الذائبةِ. وحمضُ الهيدروسيانيكِ هو مثالٌ على الحمضِ الضعيفِ. ففي المحلولِ المائيِّ، يتأيَّنُ HCN ثم يعادُ تكوينُه في التفاعلِ العكسيِّ بشكلٍ متزامنٍ. وقد أظهرتِ الحساباتُ المبنيَّةُ على التجربةِ أنه ينتجُ، في محلولِ 1 M من حمضِ الهيدروسيانيكِ HCN فقط أيونانِ H^+ وأيونانِ CN^- من كلِّ 100 000 جزيءٍ، ويبقى 99 998 جزيئًا في حالةِ HCN.

$$HCN(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + CN^-(aq)$$

يوضحُ الجدولُ 3-3 بعضَ الأحماضِ الشائعةِ، ويبدو من خلالِهِ أن كلَّ حمضٍ قويٍّ يتأيَّنُ بشكلٍ تامٍّ في المحلولِ المائيِّ، ويقدّمُ كلُّ جزيءٍ أيونًا من الهيدروجينِ. وتجدرُ الإشارةُ هنا إلى أن عددَ ذرّاتِ الهيدروجينِ في الصيغةِ الكيميائيَّةِ لا يشيرُ إلى قوةِ الحمضِ، فحمضُ الفوسفوريكِ تحتوي صيغتُهُ على 3 ذرّاتِ هيدروجينٍ، ولا يعني ذلك أنه حمضٌ قويٌّ لأنه لا يحدثُ تأيُّنٌ تامٌّ لأيٍّ من هذه الذرّاتِ.

والأحماضُ العضويَّةُ التي تحتوي على مجموعةِ الكربوكسيلِ الحمضيَّةِ هي بشكلٍ عامٍّ أحماضٌ ضعيفةٌ، كحمضِ الأسيتيكِ CH_3COOH، على سبيلِ المثالِ، الذي يتأيَّنُ في الماءِ، لكن بشكلٍ قليلٍ، ليُنتجَ أيوناتِ الهيدرونيومِ وأيوناتِ الأسيتاتِ CH_3COO^-.

$$CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$$

تحتوي صيغةُ حمضِ الأسيتيكِ على أربعِ ذرّاتِ هيدروجينٍ، ومع ذلك فإن واحدةً فقط من هذه الذرّاتِ قابلةٌ للتأيُّنِ، وهي الموجودةُ في مجموعةِ الكربوكسيلِ. هذه الذرّةُ تتمتَّعُ

بصفةٍ حمضيَّةٍ، وهي التي تنتجُ أيونَ الهيدرونيوم. والشكلُ 3-7 يظهرُ ذرّةَ الهيدروجينِ الحمضيَّةَ في حمضِ الأسيتيكِ.

الشكل 3-7 يحتوي حمضُ الأسيتيكِ على أربعِ ذرّاتِ هيدروجينٍ، واحدةٌ منها فقط تتمتَّعُ بصفةٍ حمضيَّةٍ، وهي التي تنتجُ أيونَ الهيدرونيومِ.

المحاليلُ المائيَّةُ للقواعدِ

معظمُ القواعدِ مركَّباتٌ أيونيَّةٌ تحتوي على كاتيونٍ فلزّيٍّ، وعلى أنيونِ الهيدروكسيدِ OH^-. ولأن هذه القواعدَ ذاتُ طبيعةٍ أيونيَّةٍ فإنها تتفكَّكُ عندَما تُذابُ في الماءِ. عندَما تتفكَّكُ القاعدةُ بشكلٍ تامٍّ في الماءِ يكتسبُ المحلولُ صفةَ القاعدةِ القويَّةِ. وهكذا فإن هيدروكسيدَ الصوديومِ NaOH، القابلَ للذوبانِ في الماءِ يتفكَّكُ، كما هو مبيَّنٌ في المعادلةِ التاليةِ:

$$NaOH(s) \xrightarrow{H_2O} Na^+(aq) + OH^-(aq)$$

تذكَّرْ أن عناصرَ المجموعةِ 1 فلزّاتٌ قلويَّةٌ، ويعودُ اسمُ هذه المجموعةِ إلى أن هيدروكسيداتِ الفلزّاتِ المذكورةِ، وهي Li، Na، K، Rb، Cs، تكوِّنُ جميعُها محاليلَ قلويَّةً (قاعديَّةً).

لكنَّ القواعدَ ليسَتْ كلُّها مركّباتٍ أيونيَّةً. فالأمونيا، القاعدةُ الشائعةُ الاستعمالِ في المنازلِ للتنظيفِ، مركَّبٌ جزيئيٌّ يحملُ الخاصَّةَ القاعديَّةَ لأنه يُنتجُ أيوناتِ الهيدروكسيدِ عندَما يتفاعلُ مع جزيئاتِ الماءِ بناءً على المعادلةِ التاليةِ:

$$NH_3(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows NH_4^+(aq) + OH^-(aq)$$

قوَّةُ القواعدِ

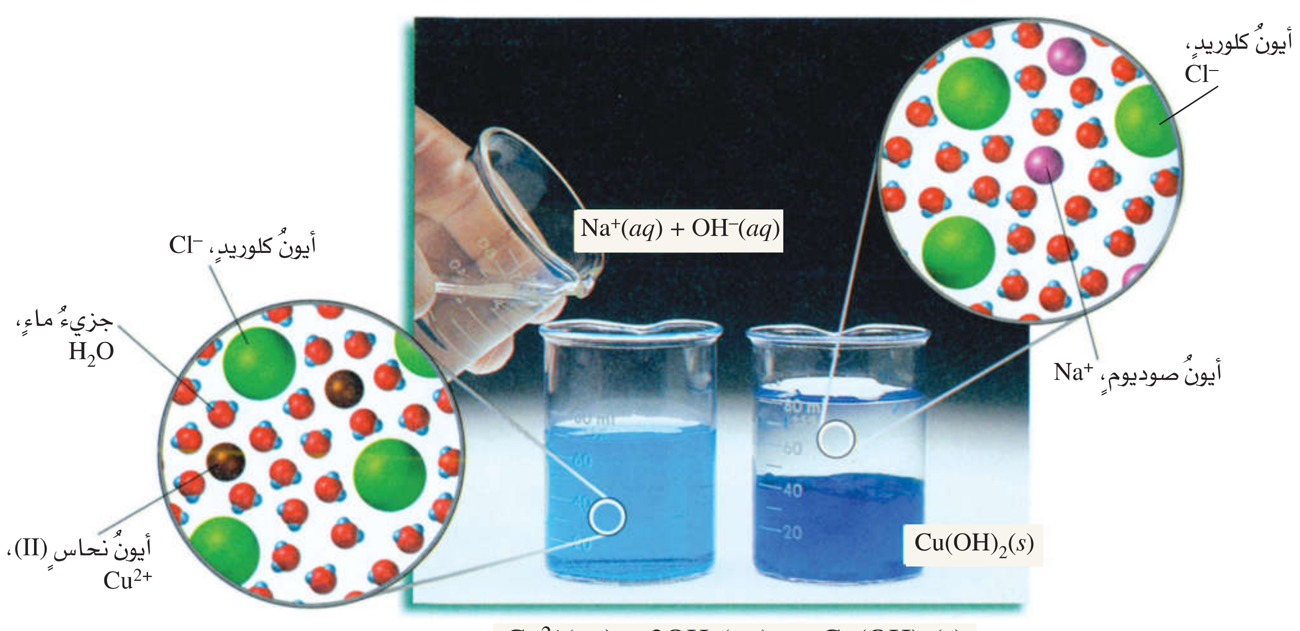
تعتمدُ قوَّةُ القواعدِ، كما في حالةِ الأحماضِ، على درجةِ تفكُّكِها أو على مدى تزويدِها للمحلولِ المائيِّ بأيوناتِ الهيدروكسيدِ. فمثلاً هيدروكسيدُ البوتاسيومِ KOH، قاعدةٌ قويَّةٌ لأنه يتفكَّكُ إلى أيوناتٍ بشكلٍ تامٍّ في المحلولِ المائيِّ المخفَّفِ.

$$KOH(s) \xrightarrow{H_2O} K^+(aq) + OH^-(aq)$$

والقواعدُ القويَّةُ هي إذن، كالأحماضِ القويَّةِ، إلكتروليتاتٌ قويَّةٌ. وفي الجدولِ 3-4 بعضُ القواعدِ القويَّةِ.

الجدولُ 3-4 قواعدُ شائعةٌ

قواعدُ قويَّةٌ	قواعدُ ضعيفةٌ
$Ca(OH)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2OH^-$	$NH_3 + H_2O \leftrightarrows NH_4^+ + OH^-$
$Sr(OH)_2 \rightarrow Sr^{2+} + 2OH^-$	$C_6H_5NH_2 + H_2O \leftrightarrows C_6H_5NH_3^+ + OH^-$
$Ba(OH)_2 \rightarrow Ba^{2+} + 2OH^-$	
$NaOH \rightarrow Na^+ + OH^-$	
$KOH \rightarrow K^+ + OH^-$	
$RbOH \rightarrow Rb^+ + OH^-$	
$CsOH \rightarrow Cs^+ + OH^-$	



الشكل 8-3 هيدروكسيداتُ معظمِ فلزّاتِ المجمَّعِ–d تقريبًا غيرُ قابلةٍ للذوبانِ في الماءِ، كما يظهرُ من الترسُّبِ الهلاميِّ لهيدروكسيدِ النحاسِ (II)، $Cu(OH)_2$، في الكأسِ اليُمنى من الشكلِ.

من المؤكَّدِ أن القواعدَ التي لا تذوبُ جيّدًا في الماءِ لا تُنتجُ فيه عددًا كبيرًا من أيوناتِ الهيدروكسيد. وكما يبيِّنُ الشكلُ 3-8 فإن هيدروكسيدَ النحاسِ $Cu(OH)_2$، وبعضَ هيدروكسيداتِ الفلزّاتِ لا تذوبُ جيّدًا في الماءِ، فهي بالتالي لا تستطيعُ أن تُنتجَ محاليلَ قلويَّةً قويَّةً. وتجدرُ الإشارةُ هنا إلى أن قلويَّةَ المحاليلِ المائيَّةِ تعتمدُ على تركيزِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ OH^- فيها، وليس على عددِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ الموجودةِ في المركّبِ غيرِ الذائبِ.

لنلاحظِ الآنَ الأمونيا التي تذوبُ جيّدًا في الماءِ، لكنها مع ذلك تعتبرُ إلكتروليتًا ضعيفًا لأن تركيزَ أيوناتِ الهيدروكسيدِ OH^- قليلٌ جدًّا في محلولِها المائيِّ. لهذا يمكنُ القولُ إن الأمونيا قاعدةٌ ضعيفةٌ. كذلك فإن الكثيرَ من المركّباتِ العضويَّةِ المحتويةِ على ذرّاتِ النيتروجينِ هي أيضًا قواعدُ ضعيفةٌ. فمثلاً الكودايين $C_{18}H_{21}NO_3$، المستعملُ كمسكِّنٍ للألمِ ومهدّئٍ للسعالِ هو قاعدةٌ ضعيفةٌ.

مراجعةُ القسمِ 3-1

1. أ. اذكرْ خمسَ خصائصَ عامَّةٍ للمحاليلِ الحمضيَّةِ.
ب. سمِّ بعضَ الموادِّ الشائعةِ التي تتميَّزُ بواحدةٍ أو أكثرَ من الخصائصِ السابقةِ.

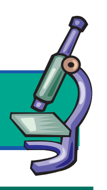
2. سمِّ الحمضَيْنِ التاليَيْنِ: أ. HBrO، ب. $HBrO_3$.

3. أ. اذكرْ خمسَ خصائصَ عامَّةٍ للمحاليلِ القاعديَّةِ.
ب. سمِّ بعضَ الموادِّ الشائعةِ التي تتميَّزُ بواحدةٍ أو أكثرَ من الخصائصِ السابقةِ.

4. أ. لماذا تُعتبرُ الأحماضُ القويَّةُ إلكتروليتاتٍ قويَّةً؟
ب. هل كلُّ إلكتروليتٍ قويٍّ هو أيضًا حمضٌ قويٌّ؟

تفكيرٌ ناقد

5. **ربطُ أفكارٍ:** أحدُ المتعلِّمينَ يقولُ: «كلُّ المركَّباتِ التي تحتوي على ذرّاتِ الهيدروجينِ هي أحماضٌ، وكلُّ المركَّباتِ التي تحتوي على مجموعاتِ OH هي قواعدُ.» هل توافقُهُ على ذلك؟ برِّرْ إجابتَكَ مع إعطاءِ أمثلةٍ.



قراءةٌ علميَّةٌ

مضادّاتُ الحموضةِ وتركيزُ الحمضِ في المعدةِ

ينتجُ الإنسانُ، المتوسِّطُ البلوغ، بينَ 2 L و 3 L من العصارةِ المِعديةِ يوميًّا. والعصارةُ المعديَّةُ سائلٌ خفيفٌ حمضيٌّ تُفرزُهُ غددُ الغشاءِ المخاطيِّ الذي يغلِّفُ المعدةَ. وهي تحتوي، بين موادَّ أخرى، على حمضِ الهيدروكلوريكِ الذي يبلغُ تركيزُهُ 0.3 M. وقوةُ هذا التركيزِ تكفي لإذابةِ فلزِّ الخارصين.

من أين تأتي أيوناتُ H^+؟ يظهرُ إلى اليسارِ رسمٌ مبسَّطٌ للمعدةِ. يتركبُ الغلافُ الداخليُّ من خلايا جداريَّةٍ متلاحمةٍ بحيثُ تكوِّنُ وصلاتٍ متماسكةً. ويحمي داخلَ الخلايا من محيطِها أغشيةٌ خلويَّةٌ تسمحُ لجزيئاتِ الماءِ وللجزيئاتِ المتعادلةِ بأن تمرَّ عبرَها من المعدةِ وإليها، لكنها تمنعُ عادةً حركةَ الأيوناتِ من أمثالِ H^+، Na^+، K^+، Cl^-. تأتي أيوناتُ H^+ من حمضِ الكربونيك، H_2CO_3، الذي ينتجُ عن تميُّؤِ CO_2، أحدِ النواتجِ النهائيَّةِ للاستقلاب:

$$CO_2(g) + H_2O(l) \rightleftharpoons H_2CO_3(aq)$$
$$H_2CO_3(aq) \rightleftharpoons H^+(aq) + HCO_3^-(aq)$$

هذه التفاعلاتُ تحدثُ في بلازما الدمِ التي تغمرُ خلايا الغشاءِ المخاطيِّ. وبواسطةِ عمليَّةٍ تُسمّى النقلَ النشطَ، تنتقلُ أيوناتُ H^+ عبرَ الغشاءِ إلى داخلِ المعدةِ. (عملياتُ النقلِ النشطِ تجري بمساعدةِ أنزيمات). ولحفظِ التوازنِ الكهربائيِّ، ينتقلُ عددٌ مماثلٌ من أيوناتِ Cl^- من بلازما الدمِ إلى المعدةِ. وبمجرَّدِ وجودِ هذه الأيوناتِ في المعدةِ تمنعُها الأغشيةُ الخلويَّةُ من العودةِ إلى بلازما الدمِ.

الغايةُ من وجودِ الوسطِ العالي الحمضيَّةِ داخلَ المعدةِ هي هضمُ الأغذيةِ وتنشيطُ بعضِ الأنزيماتِ المساعدةِ على الهضم. تنشِّطُ عمليةُ الأكلِ إفرازَ الأيوناتِ H^+. فيمتصُّ الغشاءُ المخاطيُّ من جديدٍ جزءًا صغيرًا من هذه الأيوناتِ، فيسبِّبُ ذلك نزفًا دمويًّا خفيفًا في العديدِ من المواقعِ. يوجدُ حواليَ نصفِ مليون خليَّةٍ يعادُ تغليفُها كلَّ دقيقةٍ. ويعادُ تغليفُ المعدةِ السليمةِ بشكلٍ تامٍّ كلَّ ثلاثةِ أيّامٍ. لكن، إذا كانَ محتوى المعدةِ من الحمضِ زائدًا بشكلٍ مفرطٍ، فيُمكنُ للتدفُّقِ الثابتِ للأيوناتِ H^+ عبرَ الغشاءِ، عائدةً إلى بلازما الدمِ، أن يسبِّبَ انقباضًا في العضلاتِ، أو ألمًا أو تورُّمًا أو التهابًا أو نزفًا دمويًّا.

هناك طريقةٌ تخفِّفُ مؤقَّتًا من تركيزِ أيونِ H^+ في المعدةِ، وهي تقضي بتناولِ مضادٍّ للحموضةِ. الوظيفةُ الأساسيَّةُ لمضاداتِ الحموضةِ هي معادلةُ الفائضِ من HCl في العصارةِ المعديَّةِ. هذه المضاداتُ تحتوي بشكلٍ أساسيٍّ على مركَّباتٍ مثل $NaHCO_3$، $CaCO_3$، $MgCO_3$، $Mg(OH)_2$، $Al(OH)_2NaCO_3$. وتبيِّنُ المعادلةُ التاليةُ مثالاً على عمليّاتِ التعادلِ بينَ مضاداتِ الحموضةِ وحمضِ المعدةِ.

$$NaHCO_3(aq) + HCl(aq) \rightarrow NaCl(aq) + H_2O(l) + CO_2(g)$$

يؤدّي غازُ CO_2 الذي تطلقُهُ هذه التفاعلاتُ إلى زيادةِ الضغطِ في المعدةِ، وبالتالي إلى التجشُّؤ.

يتضرَّرُ الغشاءُ المخاطيُّ كذلك من تأثيرِ الأسبيرين، وهو الاسمُ الكيميائيُّ لحمضِ أسيتيلِ الساليسيليكِ. الأسبيرينُ بحدِّ ذاتِهِ حمضٌ ضعيفٌ.

فإذا كان تركيزُ أيوناتِ H^+ عاليًا في المعدةِ يبقى هذا الحمضُ غيرَ متأيِّنٍ إلى حدٍّ بعيدٍ. تتميَّزُ الجزيئاتُ الضعيفةُ القطبيةِ لهذا الحمضِ بقدرتِها على اختراقِ الغشاءِ، وهو أيضًا مكوَّنٌ من جزيئاتٍ غيرِ قطبيَّةٍ. لكن يوجدُ داخلَ الغشاءِ كثيرٌ من جيوبِ الماءِ الصغيرةِ. فعندما تدخلُ جزيئاتُ حمضِ أسيتيلِ الساليسيليكِ هذه الجيوبَ فإنها تتأيَّنُ إلى H^+ وإلى أيوناتِ أسيتيلِ الساليسيلات. هذه الأيوناتُ تُحبسُ في مناطقِ الغشاءِ الداخليَّةِ. ويُضعِفُ تجمُّعُها المستمرُّ تركيبَ الغشاءِ ويسبِّبُ في النهايةِ نزفًا دمويًّا. إن تناولَ كلِّ قرصٍ من الأسبيرين يؤدّي عادةً إلى فقدانِ حوالي 2 mL من الدم. هذه الكمِّيَّةُ المفقودةُ من الدمِ لا تعتبرُ مؤذيةً بشكلٍ عامٍّ، إلا أنَّ تأثيرَ الأسبيرين قد يُنتِجُ نزفًا دمويًّا حادًّا عند بعضِ الأفرادِ. والجديرُ بالذكرِ أنَّ تناولَ الكحولِ الذي حرَّمَهُ اللهُ تعالى يزيدُ من ذوبانِ حمضِ أسيتيلِ الساليسيليكِ في المعدةِ ويعزِّزُ بالتالي نزفَ الدمِ.

أسئلة

1. ما دورُ الوسطِ العالي الحمضيَّةِ في العصارةِ المعديَّةِ؟
2. ماذا يحدثُ إذا وُجِدَ في المعدةِ فائضٌ من أيوناتِ H^+؟

القســـم 2-3

مؤشّراتُ الأداءِ

- يعرِّفُ أحماضَ وقواعدَ برونشتد-لوري.
- يعرِّفُ حمضَ وقاعدةَ لويس.
- يسمّي المركَّباتِ التي تعتبرُ أحماضًا بحسبِ تعريفِ لويس لكنَّها ليسَتْ كذلك بحسبِ تعريفِ برونشتد-لوري.

نظرياتُ الأحماضِ-القواعدِ

يرى العلماءُ أن تعريفَ أرهينيوس للأحماضِ والقواعدِ هو تعريفٌ ملائمٌ لمعظمِ الاستخداماتِ، بالرغمِ من أنهم وجدوا، من خلالِ بحثِهم المتواصلِ لسلوكِ الحمضِ-القاعدةِ، أن بعضَ الموادِّ تسلكُ كأحماضٍ أو كقواعدَ دون أن تكونَ في المحلولِ المائيِّ. وبما أن تعريفَ أرهينيوس يتطلَّبُ أن تكونَ الموادُّ مذابةً في الماءِ فإنه ينبغي مراجعةُ تعريفاتِ الأحماضِ والقواعدِ.

أحماضُ وقواعدُ برونشتد-لوري

في سنةِ 1923 عمدَ الكيميائيُّ الدنماركيُّ برونشتد والكيميائيُّ الإنكليزيُّ لوري، وبشكلٍ مستقلٍّ، إلى توسيعِ تعريفِ أرهينيوس للحمضِ. وهكذا فإن **حمضَ برونشتد-لوري Brønsted-Lowry acid** ***هو جزيءٌ أو أيونٌ مانحٌ للبروتون.*** وبما أن H^+ هو بروتونٌ فإن جميعَ الأحماضِ، بحسبِ تعريفِ أرهينيوس، تمنحُ بروتوناتٍ للماءِ، فهي إذن أحماضُ برونشتد-لوري أيضًا. وإن الموادَّ غيرَ الجزيئيَّةِ، كبعضِ الأيوناتِ، يمكنُها هي أيضًا أن تمنحَ البروتوناتِ. هذه الموادُّ ليسَتْ أحماضَ أرهينيوس، بل هي من فئةِ أحماضِ برونشتد-لوري.

إن كلوريدَ الهيدروجينِ يعملُ كحمضِ برونشتد-لوري عندَما يتفاعلُ مع الأمونيا. وهكذا يمنحُ HCl بروتوناتٍ إلى NH_3 كما يفعلُ في الماءِ.

$$HCl + NH_3 \rightarrow NH_4^+ + Cl^-$$

هذه المعادلةُ تُظهرُ انتقالَ بروتونٍ من جزيءِ كلوريدِ الهيدروجينِ HCl إلى جزيءِ الأمونيا NH_3، بحيث يتكوَّنُ أيونُ الأمونيوم NH_4^+. تبيِّنُ صيغُ الترميزِ النقطيِّ للإلكتروناتِ التشابهَ بين التفاعلِ السابقِ والتفاعلِ بين HCl والماءِ.

$$H:\ddot{\underset{\cdot\cdot}{Cl}}: + H:\ddot{\underset{H}{O}}: \rightarrow \left[H:\ddot{\underset{H}{O}}:H\right]^+ + :\ddot{\underset{\cdot\cdot}{Cl}}:^-$$

$$H:\ddot{\underset{\cdot\cdot}{Cl}}: + H:\ddot{\underset{H}{N}}:H \rightarrow \left[H:\overset{H}{\underset{H}{N}}:H\right]^+ + :\ddot{\underset{\cdot\cdot}{Cl}}:^-$$

في هذَيْن التفاعلَيْن يظهرُ كلوريدُ الهيدروجينِ كحمضِ برونشتد-لوري.

أما الماءُ فيمكنُهُ أيضًا أن يتفاعلَ كحمضِ برونشتد-لوري. لنلاحظْ مثلاً، التفاعلَ التالي الذي يمنحُ خلالَهُ جزيءُ الماءِ بروتونًا لجزيءِ الأمونيا.

$$H_2O(l) + NH_3(aq) \leftrightarrows NH_4^+(aq) + OH^-(aq)$$

$$H:\ddot{\underset{H}{O}}: + H:\ddot{\underset{H}{N}}:H \leftrightarrows \left[H:\overset{H}{\underset{H}{N}}:H\right]^+ + \left[:\ddot{\underset{H}{O}}:\right]^-$$

الشكل 3-9 ينبعثُ غازُ كلوريدِ الهيدروجينِ من محلولِ حمضِ الهيدروكلوريكِ، ويتَّحدُ مع غازِ الأمونيا المنبعثِ من المحلولِ المائيِّ للأمونيا. والسحابةُ الناتجةُ هي كلوريدُ الأمونيومِ الصلبُ المنتشرُ في الهواءِ.

قاعدةُ برونشتد-لوري Brønsted-Lowry base ***هي جزيءٌ أو أيونٌ مستقبلٌ للبروتونِ.*** في التفاعلِ بينَ حمضِ الهيدروكلوريكِ والأمونيا، تستقبلُ الأمونيا بروتونًا من حمضِ الهيدروكلوريكِ، وبذلك تكونُ الأمونيا قاعدةَ برونشتد-لوري. أما الهيدروكسيداتُ، التي هي قواعدُ أرهينيوس مثلُ NaOH، فليسَتْ بشكلٍ دقيقٍ قواعدَ برونشتد-لوري، في حينِ أن أيونَ OH^- الناتجَ في المحلولِ هو قاعدةُ برونشتد-لوري. هذا الأيون هو الذي يستقبلُ البروتونَ.

في التفاعلِ بينَ حمضٍ وقاعدةِ برونشتد-لوري Brønsted-Lowry acid-base reaction ***تنتقلُ البروتوناتُ من الحمضِ إلى القاعدةِ.*** *يُظهرُ* الشكلُ 3-9 التفاعلَ بين حمضِ برونشتد-لوري HCl وقاعدةِ برونشتد-لوري NH_3.

أحماضٌ أحاديَّةٌ وأحماضٌ متعدِّدةُ البروتوناتِ

الحمضُ الذي يمنحُ بروتونًا واحدًا فقطْ (أيونَ الهيدروجين) من كلِّ جزيءٍ يُعرفُ باسمِ الحمضِ أحاديِّ البروتونِ **monoprotic acid**. فحمضُ البيركلوريكِ $HClO_4$ وحمضُ الهيدروكلوريكِ HCl وحمضُ النيتريكِ HNO_3 هي جميعُها أحاديَّةُ البروتونِ. والمعادلةُ التاليةُ تظهرُ كيف يمنحُ جزيءٌ من الحمضِ أحاديِّ البروتونِ HCl بروتونًا لجزيءٍ من الماءِ. فالحمضُ HCl يتأيَّنُ بخطوةٍ واحدةٍ ليكوِّنَ الأيونينِ H_3O^+ و Cl^-:

$$HCl(g) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

أما **الحمضُ متعدِّدُ البروتونِ polyprotic acid** ***فهو حمضٌ يستطيعُ أن يمنحَ أكثرَ من بروتونٍ من كلِّ جزيءٍ.*** فحمضُ الكبريتيكِ H_2SO_4، وحمضُ الفوسفوريكِ H_3PO_4، مثالانِ على الأحماضِ متعدِّدةِ البروتونِ. لذلك فإن تأيُّنَ هذا الحمضِ هو عمليَّةٌ متعدِّدةُ المراحلِ، حيث يفقدُ الحمضُ أيونًا من الهيدروجينِ في كلِّ مرحلةٍ.

فحمضُ الكبريتيكِ يتأيَّنُ في مرحلتَيْن. في مرحلةِ التأيُّنِ الأولى يكونُ حمضُ الكبريتيكِ حمضًا قويًّا يتحوَّلُ بشكلٍ تامٍّ إلى أيوناتِ الكبريتاتِ الهيدروجينيَّةِ HSO_4^-.

$$H_2SO_4(l) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + HSO_4^-(aq)$$

أما أيونُ الكبريتاتِ الهيدروجينيَّةِ فهو حمضٌ ضعيفٌ يخضعُ في مرحلةِ التأيُّنِ الثانيةِ للاتِّزانِ التالي في المحلولِ.

$$HSO_4^-(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + SO_4^{2-}(aq)$$

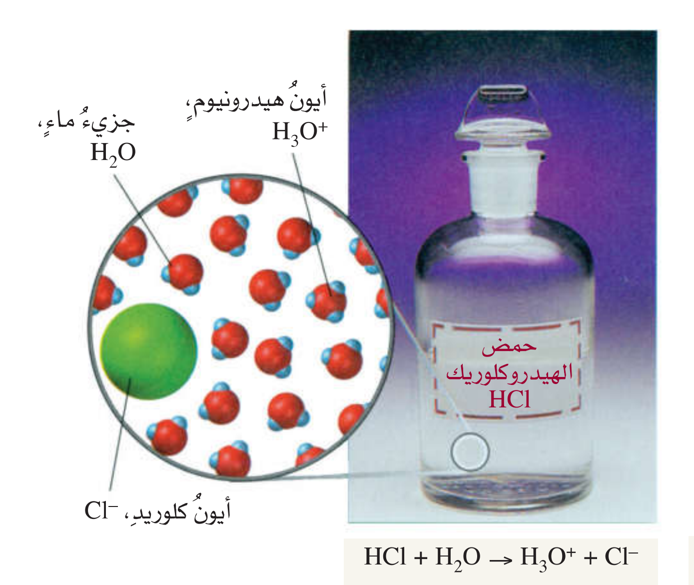
كلُّ مراحلِ التأيُّنِ لحمضٍ متعدِّدِ البروتونِ تحدثُ في المحلولِ نفسِه. لذلك تحتوي محاليلُ حمضِ الكبريتيكِ على H_3O^+ و HSO_4^- و SO_4^{2-}. وتجدرُ الإشارةُ إلى أن محاليلَ حمضِ الكبريتيكِ تحتوي على عددٍ من أيوناتِ الكبريتاتِ الهيدروجينيَّةِ وأيوناتِ الهيدرونيومِ أكبرَ بكثيرٍ من عددِ أيوناتِ الكبريتاتِ.

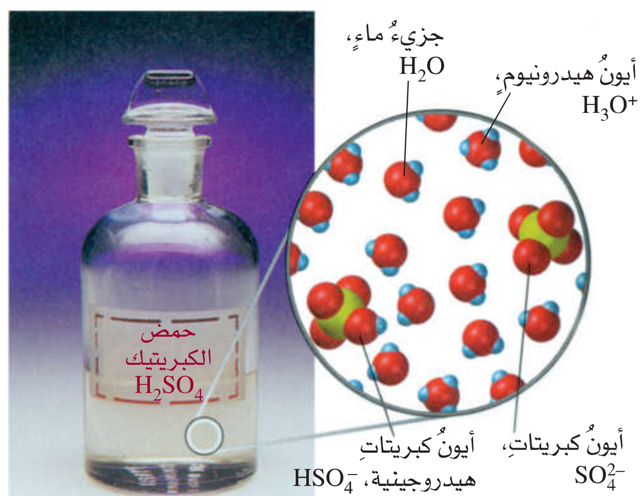
يعتبرُ حمضُ الكبريتيكِ نوعًا من الحمضِ المتعدِّدِ البروتونِ. ***فهو يستطيعُ أن يمنحَ بروتونَيْنِ اثنَيْنِ من كلِّ جزيءٍ، لذلك فهو يُعرفُ باسمِ الحمضِ ثنائيِّ البروتونِ*** **diprotic acid**. يُظهرُ الشكلُ 3-10 تأيُّنَ حمضٍ أحاديِّ البروتونِ وحمضٍ ثنائيِّ البروتونِ.

حمضُ الفوسفوريكِ نوعٌ آخرُ من الأحماضِ متعدِّدةِ البروتونِ، وهو يعرفُ باسمِ **الحمضِ ثلاثيِّ البروتونِ triprotic acid** ***أي هو الحمضُ الذي يمنحُ ثلاثةَ بروتوناتٍ من كلِّ جزيءٍ***. ومعادلاتُ هذه التفاعلاتِ هي التالية:

$$H_3PO_4(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + H_2PO_4^-(aq)$$
$$H_2PO_4^-(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + HPO_4^{2-}(aq)$$
$$HPO_4^{2-}(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows H_3O^+(aq) + PO_4^{3-}(aq)$$

الشكل 3-10 حمضُ الهيدروكلوريكِ HCl هو حمضٌ قويٌّ أحاديُّ البروتونِ. لذلك يحتوي محلولُهُ المائيُّ المخففُ على أيوناتِ الهيدرونيومِ والكلوريدِ. وحمضُ الكبريتيكِ H_2SO_4 حمضٌ قويٌّ ثنائيُّ البروتونِ، يحتوي محلولُهُ المائيُّ المخففُ على أيوناتِ الكبريتاتِ الهيدروجينيَّةِ الناتجةِ من مرحلةِ التأيُّنِ الأولى، وعلى أيوناتِ الكبريتاتِ التي تنتجُ من مرحلةِ التأيُّنِ الثانيةِ، ويحتوي أيضًا على أيوناتِ الهيدرونيومِ التي تنتجُ من المرحلتَيْنِ معًا.





يحتوي محلولُ حمضِ الفوسفوريكِ على H_3O^+، H_3PO_4، $H_2PO_4^-$، HPO_4^{2-}، PO_4^{3-}. وكما هي حالُ معظمِ الأحماضِ متعدِّدةِ البروتونِ، فإن تركيزَ الأيوناتِ المتكوِّنةِ خلالَ مرحلةِ التأيُّنِ الأولى لهذا الحمضِ هو الأكبرُ. وينخفضُ تركيزُ الأيوناتِ تباعًا بحسبِ تتابعِ مراحلِ التأيُّنِ. لهذا يُعدُّ حمضُ الفوسفوريكِ حمضًا ضعيفًا في كلِّ مرحلةٍ من مراحلِ تأيُّنِه.

أحماضُ وقواعدُ لويس

تصفُ تعريفاتُ أرهينيوس وبرونشتد–لوري معظمَ الأحماضِ والقواعدِ، وتفترضُ هذه التعريفاتُ أن الحمضَ يحتوي أو يُنتِجُ أيوناتِ الهيدروجينِ. وهناك تصنيفٌ ثالثٌ للأحماضِ، يستندُ إلى روابطِ الجزيءِ وتركيبِه، يتضمَّنُ أحماضًا كأحماضِ تلك المركَّباتِ التي لا تحتوي على الهيدروجينِ. ففي سنةِ 1923 أدخلَ الكيميائيُّ الأميركيُّ لويس، الذي ارتبطَ اسمُهُ ببنى الترميزِ النقطيِّ للإلكتروناتِ، تعريفًا لهذا التصنيفِ الثالثِ من الأحماضِ. يظهرُ تعريفُ لويس للأحماضِ دورَ أزواجِ الإلكتروناتِ في تفاعلاتِ الحمضِ–القاعدةِ. وبحسبِ هذا التعريفِ فإن **حمضَ لويس Lewis acid** ***ذرّةٌ أو أيونٌ أو جزيءٌ يستقبلُ زوجًا من الإلكترونات ليكوِّنَ رابطةً تساهميَّةً.***

ويعدُّ تعريفُ لويس من بين التعريفاتِ الثلاثةِ الأشملِ والأوسعِ. فهو ينطبقُ على أيِّ نوعٍ قادرٍ على استقبالِ زوجٍ من الإلكترونات ليكوِّنَ رابطةً تساهميَّةً مع نوعٍ آخرَ. بناءً على ذلك فإن البروتونَ (أيونَ هيدروجينٍ) هو حمضُ لويس الذي يكوِّنُ في التفاعلاتِ رابطةً تساهميَّةً، كما يظهرُ هنا:

$$H^+(aq) + :NH_3(aq) \longrightarrow [H - NH_3]^+(aq) \text{ أو } [NH_4]^+(aq)$$

فإذن ليس من الضروريِّ أن تحتويَ الصيغةُ الكيميائيَّةُ لحمضِ لويس على الهيدروجينِ، حتى أن أيونَ الفضَّةِ يمكنُ أن يكونَ حمضَ لويس لأنه يستقبلُ أزواجًا من الإلكتروناتِ من الأمونيا ليكوِّنَ روابطَ تساهميَّةً:

$$Ag^+(aq) + 2:NH_3(aq) \longrightarrow [H_3N - Ag - NH_3]^+(aq) \text{ أو } [Ag(NH_3)_2]^+(aq)$$

إن أيَّ مركَّبٍ تمتلكُ ذرّتُهُ المركزيَّةُ ثلاثةَ إلكتروناتِ تكافؤ، وتكوِّنُ بالتالي ثلاثَ روابطَ تساهميَّةٍ، يمكنُ أن يسلكَ كحمضِ لويس. فعندما يستقبلُ زوجًا من الإلكتروناتِ ليكوِّنَ رابطةً تساهميَّةً رابعةً تكمُلُ الثمانيةُ إلكتروناتٍ. فثلاثيُّ فلوريدِ البورونِ، على سبيلِ المثالِ، هو حمضُ لويس حيث يكوِّنُ رابطةً تساهميَّةً رابعةً مع كثيرٍ من الجزيئاتِ والأيوناتِ، كما يَظهرُ تفاعلُهُ مع أيونِ الفلوريدِ على الشكلِ التالي:

$$\begin{array}{c}:\ddot{F}:\\ :\ddot{F}:B\\ :\ddot{F}:\end{array} + :\ddot{F}:^- \longrightarrow \left[\begin{array}{c}:\ddot{F}:\\ :\ddot{F}:\ddot{B}:\ddot{F}:\\ :\ddot{F}:\end{array}\right]^-$$

$$BF_3(aq) + F^-(aq) \longrightarrow BF_4^-(aq)$$

الجدولُ 3-5 تعريفاتُ الحمضِ-القاعدةِ

النوعُ	حمضٌ	قاعدةٌ
أرهينيوس	منتجٌ للأيونِ H^+ أو H_3O^+	منتجٌ للأيونِ OH^-
برونشتد-لوري	مانحٌ للأيونِ H^+	مستقبلٌ للأيونِ H^+
لويس	مستقبلٌ لزوجٍ من الإلكتروناتِ	مانحٌ لزوجٍ من الإلكتروناتِ

يمكنُ تطبيقُ تعريفِ لويس على الأنواعِ في كلِّ حالاتِها. فمثلاً يتَّحدُ في الحالةِ الغازيَّةِ ثلاثيُّ فلوريدِ البورون، بصفتِهِ حمضَ لويس، مع الأمونيا.

$$BF_3 + :NH_3 \rightarrow F_3B:NH_3$$

أما **قاعدةُ لويس Lewis base** ***فهي ذرَّةٌ أو أيونٌ أو جزيءٌ يمنحُ زوجًا من الإلكتروناتِ ليكوِّنَ رابطةً تساهميَّةً.*** بناءً على ذلك فالأنيونُ هو قاعدةُ لويس في التفاعلِ الذي يكوِّنُ فيه رابطةً تساهميَّةً بمنحِهِ زوجًا من الإلكتروناتِ. ففي مثالِ تفاعلِ ثلاثيِّ فلوريدِ البورونِ مع أنيونِ الفلوريدِ، يمنحُ F^- لثلاثيِّ فلوريدِ البورون زوجًا من الإلكتروناتِ. وبذلك يكونُ F^- قاعدةَ لويس.

$$BF_3(aq) + :\ddot{F}:^-(aq) \rightarrow BF_4^-(aq)$$

تفاعلُ حمضٍ-قاعدةِ لويس Lewis acid-base reaction ***هو تكوُّنُ واحدةٍ أو أكثرَ من الروابطِ التساهميَّةِ بين مانحِ زوجٍ من الإلكتروناتِ وبين مستقبلِه.***

تجدرُ الملاحظةُ هنا أنه، برغمِ التبايناتِ الظاهرةِ بين التعريفاتِ الثلاثةِ، فإن الكثيرَ من المركَّباتِ يمكنُ تصنيفُها كأحماضٍ أو كقواعدَ تبعًا لهذه التعريفاتِ مجتمعةً. فمثلاً، الأمونيا هي أوَّلاً قاعدةٌ بحسبِ مفهومِ أرهينيوس لأنها تنتجُ أيونَ الهيدروكسيدِ OH^- عندما تكونُ الأمونيا في الماءِ. وهي ثانيًا قاعدةٌ، بحسبِ تعريفِ برونشتد-لوري، لأنها تستقبلُ بروتونًا خلالَ التفاعلِ الحمضِ-القاعدةِ، وهي ثالثًا قاعدةُ لويس في جميعِ التفاعلاتِ التي تمنحُ الأمونيا خلالَها زوجًا من الإلكتروناتِ، لتكوِّنَ رابطةً تساهميَّةً. يُظهرُ الجدولُ 3-5 مقارنةً بين تعريفاتِ الحمضِ-القاعدةِ الثلاثةِ.

مراجعةُ القسمِ 3-2

1. في التفاعلِ التالي حدِّدْ لكلِّ متفاعلٍ صفةً من هذه الصفاتِ: مانحٌ أو مستقبلٌ للبروتون، حمضيٌّ أو قاعديٌّ.

$$H_2CO_3 + H_2O \leftrightarrows HCO_3^- + H_3O^+$$

2. في التفاعلِ التالي حددْ لكلِّ متفاعلٍ صفةً من هذه الصفاتِ: مانحٌ أو مستقبلٌ لزوجٍ من الإلكتروناتِ، حمضُ أو قاعدةُ لويس.

$$AlCl_3 + Cl^- \rightarrow AlCl_4^-$$

تفكيرٌ ناقد

3. معلوماتٌ تحليليَّةٌ: في التفاعلاتِ الثلاثةِ التاليةِ صنِّفِ المتفاعلاتِ إلى قواعدِ أرهينيوس، وقواعدِ برونشتد-لوري وقواعدِ لويس. فسِّرْ إجابتَك.

أ. $NaOH(s) \rightarrow Na^+(aq) + OH^-(aq)$

ب. $HF(aq) + H_2O(l) \leftrightarrows F^-(aq) + H_3O^+(aq)$

ج. $H^+(aq) + NH_3(aq) \leftrightarrows NH_4^+(aq)$

القسم 3-3

مؤشّراتُ الأداءِ

- يصفُ الحمضَ المرافقَ والقاعدةَ المرافقةَ والمركّبَ الأمفوتيريَّ.
- يعرِّفُ عمليَّةَ التعادلِ.
- يعرِّفُ المطرَ الحمضيَّ، ويعطي أمثلةً على المركَّباتِ التي تسبِّبُ المطرَ الحمضيَّ موضِّحًا تأثيراتِه.

تفاعلاتُ الحمضِ-القاعدةِ

درستَ سابقًا ثلاثَ نظرياتٍ للأحماضِ والقواعدِ هي: نظريةُ أرهينيوس ونظريَّةُ برونشتد-لوري ونظريَّةُ لويس. لكنَّ نظرية برونشتد-لوري تعتبرُ بشكلٍ خاصٍّ النظريَّةَ المعتمدةَ بنجاحٍ لوصفِ تفاعلاتِ الحمضِ-القاعدةِ التي تحدثُ في المحاليلِ المائيَّةِ. هذا القسمُ سيستخدمُ هذه النظريَّةَ لاستكشافِ التفاعلاتِ بين الأحماضِ والقواعدِ.

الأحماضُ والقواعدُ المرافقةُ

تقدِّمُ تعريفاتُ برونشتد-لوري للأحماضِ والقواعدِ أساسًا لدراسةِ التفاعلاتِ القائمةِ على انتقالِ البروتون. لنفترضْ أن حمضَ برونشتد-لوري يمنحُ بروتونًا، فإن الأيونَ أو الجزيءَ المتبقّيَ يستطيعُ استقبالَ هذا البروتونِ مرَّةً أخرى، وهو بهذا يعملُ كقاعدةٍ. هذه القاعدةُ تعرفُ باسمِ القاعدةِ المرافقةِ. بناءً على ذلك ***فإن النوعَ الناتجَ (جزيئًا كان أو أيونًا)، بعد أن يعطيَ حمضُ برونشتد-لوري بروتونًا، يُسمَّى* القاعدةَ المرافقة conjugate base *لهذا الحمضِ.*** فأيونُ الفلوريدِ، مثلاً، هو القاعدةُ المرافقةُ لحمضِ الهيدروفلوريكِ.

$$HF(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows F^-(aq) + H_3O^+(aq)$$
حمضٌ   قاعدةٌ مرافقةٌ

في هذا التفاعلِ يلعبُ جزيءُ الماءِ دورَ قاعدةِ برونشتد-لوري، لأنه يستقبلُ بروتونًا من HF ليكوِّنَ H_3O^+ الذي هو حمضٌ، إذن أيونُ الهيدرونيومِ هو الحمضُ المرافقُ للماءِ. بذلك ***يكونُ النوعُ الناتجُ، بعد استقبالِ قاعدةِ برونشتد-لوري بروتونًا، هو الحمضَ المرافقَ* conjugate acid *لهذه القاعدةِ.***

$$HF(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows F^-(aq) + H_3O^+(aq)$$
قاعدةٌ   حمضٌ مرافقٌ

وبشكلٍ عامٍّ، فإن تفاعلاتِ الحمضِ-القاعدةِ لبرونشتد-لوري هي أنظمةُ اتِّزانٍ، وهذا يعني أن التفاعلَيْنِ، الأماميَّ والعكسيَّ، يحدثانِ في الوقتِ نفسِه. وهذانِ التفاعلانِ يتضمنانِ زوجَيْ حمضٍ-قاعدةٍ مما يُعرَفُ بالأزواجِ المرافقةِ، كما في المعادلةِ التاليةِ:

$$HF(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows F^-(aq) + H_3O^+(aq)$$
$حمض_1$ $قاعدة_2$ $قاعدة_1$ $حمض_2$

الرمزُ السفليُّ يشيرُ إلى زوجي الحمضِ-القاعدةِ المرافقَيْنِ: (1) HF و F^-، (2) H_3O^+ و H_2O. وفي كلِّ زوجِ حمضٍ-قاعدةٍ مُرافقٍ يحتوي الحمضُ على بروتونٍ واحدٍ أكثرَ من قاعدتِهِ المرافقةِ.

قوّةُ الأحماضِ والقواعدِ المرافقةِ

تعتمدُ درجةُ التفاعلِ بينَ حمضٍ وقاعدةِ برونشتد-لوري على القوةِ النسبيَّةِ للأحماضِ والقواعدِ المتفاعلةِ. فحمضُ الهيدروكلوريكِ هو حمضٌ قويٌّ يمنحُ بروتونًا بسهولةٍ، لذلك يتّصفُ الأيونُ Cl^- بميلٍ ضعيفٍ إلى اجتذابِ بروتونٍ والاحتفاظِ بهِ. ينتجُ عن ذلك أن الأيونَ Cl^- قاعدةٌ ضعيفةٌ للغايةِ.

$$HCl(g) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

حمضٌ قويٌّ　قاعدةٌ　حمضٌ　قاعدةٌ ضعيفةٌ

هذه الملاحظةُ تقودُ إلى استنتاجٍ مهمٍّ هو: ***بقدرِ ما يكونُ الحمضُ قويًا تكونُ قاعدتُهُ المرافقةُ ضعيفةً، وبقدرِ ما تكونُ القاعدةُ قويَّةً يكونُ حمضُها المرافقُ ضعيفًا.***

هذا المفهومُ يسمحُ بمقارنةِ قوى مختلفِ الأحماضِ والقواعدِ لتوقُّعِ نواتجِ التفاعلِ. لنلاحظْ، على سبيلِ المثالِ، تفاعلَ حمضِ البيركلوريكِ، $HClO_4$، مع الماءِ.

$$HClO_4(aq) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + ClO_4^-(aq)$$

حمضٌ أقوى　قاعدةٌ أقوى　حمضٌ أضعفُ　قاعدةٌ أضعفُ

في هذا المثالِ، أيونُ الهيدرونيوم أضعفُ بكثيرٍ من أن ينافسَ حمضَ البيركلوريكِ على منحِ البروتونِ، لأن هذا الأخيرَ هو الحمضُ الأقوى. كما أن أيونَ البيركلوراتِ والماءَ قاعدتان. ولأن $HClO_4$ حمضٌ قوي جدًّا فإن الأيونَ ClO_4^- قاعدةٌ ضعيفةٌ جدًّا. لذلك يتنافسُ الماءُ بقوةٍ أكبرَ من ClO_4^- للحصولِ على البروتونِ. وبالتالي يتفاعلُ الحمضُ الأقوى مع القاعدةِ الأقوى لينتجا الحمضَ الأضعفَ والقاعدةَ الأضعفَ.

لنلاحظْ، مقارنةً بما سبقَ، التفاعلَ بين الماءِ وحمضِ الأسيتيكِ.

$$CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \leftarrow H_3O^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$$

حمضٌ أضعفُ　قاعدةٌ أضعفُ　حمضٌ أقوى　قاعدةٌ أقوى

في هذا التفاعلِ يكونُ تركيزُ الأيونِ H_3O^+ في المحلولِ أقلَّ بكثيرٍ مما كانَ في محلولِ $HClO_4$، لأن حمضَ الأسيتيكِ هو حمضٌ ضعيفٌ. وجزيءُ هذا الحمضِ لا يمكنُهُ منافسةُ أيونِ H_3O^+ في منحِ بروتونٍ للقاعدةِ. في المقابلِ، أيونُ الأسيتاتِ، CH_3COO^-، قاعدةٌ أقوى من الماءِ، لذلك جزيءُ الماءِ لا يمكنُهُ منافسةُ أيونِ الأسيتاتِ CH_3COO^-، في استقبالِ بروتونٍ. فأيونُ H_3O^+، بالتالي، هو الحمضُ الأقوى وأيونُ الأسيتاتِ، CH_3COO^-، هو القاعدةُ الأقوى. بذلك يكونُ اتجاهُ التفاعلِ نحو اليسارِ هو المرجَّحَ.

تجدرُ الملاحظةُ أن التفاعلَيْنِ السابقَيْنِ، مع حمضِ البيركلوريكِ وحمضِ الأسيتيكِ، يَحدثانِ في الاتجاهِ المرجَّحِ، أي نحوَ الحمضِ والقاعدةِ الأضعفَيْنِ. هذه الملاحظةُ تقودُ إلى استنتاجٍ ثانٍ مهمٍّ وعامٍّ هو: ***التفاعلاتُ القائمةُ على انتقالِ البروتونِ تفضّلُ إنتاجَ الحمضِ الأضعفِ والقاعدةِ الأضعفِ.*** إذن، لكي يقتربَ التفاعلُ من تمامِهِ يجبُ أن يكونَ المتفاعلانِ، الحمضُ والقاعدةُ، أقوى بكثيرٍ من الناتجَيْنِ.

بمقارنةِ العديدِ من الأحماضِ والقواعدِ المختلفةِ يمكنُ الوصولُ إلى الجدولِ 3-6. وتجدرُ الملاحظةُ هنا أن الحمضَ القويَّ جدًّا، كحمضِ البيركلوريكِ $HClO_4$، له قاعدةٌ مرافقةٌ ضعيفةٌ جدًّا ClO_4^-. والقاعدةُ الأقوى الموضَّحةُ في الجدولِ المذكورِ، هي أيونُ الهيدريدِ H^-، ولها الحمضُ المرافقُ الأضعفُ، H_2. في المحاليلِ المائيَّةِ جميعُ الأحماضِ القويَّةِ تتأيَّنُ بنسبةِ 100%، مكوّنةً أيونَ الهيدرونيوم وأنيوناتِها المتناظرةَ. وفي الجدولِ

الكيمياءُ تطبيقيًّا

«إنها حبةُ دواءٍ مرَّةٌ»

هل تساءلتَ مرَّةً عن مصدرِ القولِ، «إنها حبةُ دواءٍ مرَّةٌ، يصعبُ ابتلاعُها»؟ هذا القولُ يُستخدَمُ لوصفِ واقعٍ يصعبُ تقبُّلُه. يوجدُ كثيرٌ من الأدويةِ التي تحتوي على قواعدَ. والطَّعْمُ المرُّ خاصَّةٌ من خصائصِ القواعدِ. لذلك هناك أدويةٌ كثيرةٌ مرَّةُ المذاقِ. فإذا نظرتَ إلى الصيغِ الكيميائيَّةِ لمكوِّناتِ الأدويةِ ترى أنها تحتوي غالبًا على النيتروجينِ. وأحدُ هذه المكوّناتِ هو الكافيين الذي يعملُ كمنشّطٍ للجهازِ العصبيِّ المركزيِّ وللجهازِ التنفُّسيِّ. الصيغةُ الكيميائيةُ للكافيينِ هي $C_8H_{10}N_4O_2$. وللكافيين، كما للأمونيا، خصائصُ قاعديَّةٌ، لأنه يحتوي على النيتروجينِ القادرِ على استقبالِ البروتونِ.

الجدولُ 3-6 القوّةُ النسبيّةُ للأحماضِ والقواعدِ

الحمضُ المرافقُ	الصيغةُ	القاعدةُ المرافقةُ	الصيغةُ
حمضُ الهيدرويوديكِ*	HI	أيونُ اليوديدِ	I^-
حمضُ البيركلوريكِ*	$HClO_4$	أيونُ البيركلوراتِ	ClO_4^-
حمضُ الهيدروبروميكِ*	HBr	أيونُ البروميدِ	Br^-
حمضُ الهيدروكلوريكِ*	HCl	أيونُ الكلوريدِ	Cl^-
حمضُ الكبريتيكِ*	H_2SO_4	أيونُ الكبريتاتِ الهيدروجينيّةِ	HSO_4^-
حمضُ الكلوريكِ*	$HClO_3$	أيونُ الكلوراتِ	ClO_3^-
حمضُ النيتريكِ*	HNO_3	أيونُ النيتراتِ	NO_3^-
أيونُ الهيدرونيومِ	H_3O^+	الماءُ	H_2O
حمضُ الكلوروزِ	$HClO_2$	أيونُ الكلوريتِ	ClO_2^-
أيونُ الكبريتاتِ الهيدروجينيّةِ	HSO_4^-	أيونُ الكبريتاتِ	SO_4^{2-}
حمضُ الفوسفوريكِ	H_3PO_4	أيونُ فوسفاتِ ثنائيِّ الهيدروجين	$H_2PO_4^-$
حمضُ الهيدروفلوريكِ	HF	أيونُ الفلوريدِ	F^-
حمضُ الأسيتيكِ	CH_3COOH	أيونُ الأسيتاتِ	CH_3COO^-
حمضُ الكربونيكِ	H_2CO_3	أيونُ الكربوناتِ الهيدروجينيّةِ	HCO_3^-
حمضُ الهيدروكبريتيكِ	H_2S	أيونُ كبريتيد الهيدروجين	HS^-
أيونُ الفوسفاتِ ثنائيِّ الهيدروجين	$H_2PO_4^-$	أيونُ الفوسفات الهيدروجينيّةِ	HPO_4^{2-}
حمضُ الهيبوكلوروز	$HClO$	أيونُ الهيبوكلوريت	ClO^-
أيونُ الأمونيومِ	NH_4^+	الأمونيا	NH_3
أيونُ الكربوناتِ الهيدروجينيّةِ	HCO_3^-	أيونُ الكربوناتِ	CO_3^{2-}
أيونُ الفوسفاتِ الهيدروجينيّةِ	HPO_4^{2-}	أيونُ الفوسفاتِ	PO_4^{3-}
الماءُ	H_2O	أيونُ الهيدروكسيدِ	OH^-
الأمونيا	NH_3	أيونُ الأميدِ**	NH_2^-
الهيدروجينُ	H_2	أيونُ الهيدريدِ**	H^-

زيادةٌ في قوّةِ الحمضِ

زيادةٌ في قوّةِ القاعدةِ

*حمضٌ قويٌّ

**قاعدةٌ قويّةٌ

جميعُ الأحماضِ الواقعةِ تحتَ أيونِ الهيدرونيوم لا تتأيَّنُ بنسبةِ 100% في الماءِ. لا يمكنُ توقُّعُ النشاطيَّةِ فقط من خلالِ قوةِ الحمضِ، فعلى الرغمِ من أن الماءَ حمضٌ ضعيفٌ، فإن أيونَ الهيدريدِ قاعدةٌ ذاتُ قوةٍ كافيةٍ لانتزاعِ بروتونٍ من الماءِ. يوضحُ الشكلُ 3-11 تفاعلاً من هذا النوعِ.

المركّباتُ الأمفوتيريّةُ

لعلَّكَ لاحظْتَ أن الماءَ يستطيعُ أن يكونَ إما حمضًا وإما قاعدةً. لذلك، ***أيُّ مادةٍ يمكنُها أن تتفاعلَ كحمضٍ أو كقاعدةٍ توصفُ بأنها*** أمفوتيريّةٌ **amphoteric**. ومثالُ ذلك، التأيُّنُ الأوَّلُ لحمضِ الكبريتيكِ، حيثُ يتفاعلُ الماءُ بصفتِهِ قاعدةً.

$$CaH_2(s) + 2H_2O(l) \rightarrow Ca(OH)_2(aq) + 2H_2(g)$$

الشكل 3-11 هيدريدُ الكالسيوم، CaH_2، يتفاعلُ بقوَّةٍ مع الماءِ لينتجَ غازَ الهيدروجين.

$$\underset{\text{حمض}_1}{H_2SO_4(aq)} + \underset{\text{قاعدة}_2}{H_2O(l)} \rightarrow \underset{\text{حمض}_2}{H_3O^+(aq)} + \underset{\text{قاعدة}_1}{HSO_4^-(aq)}$$

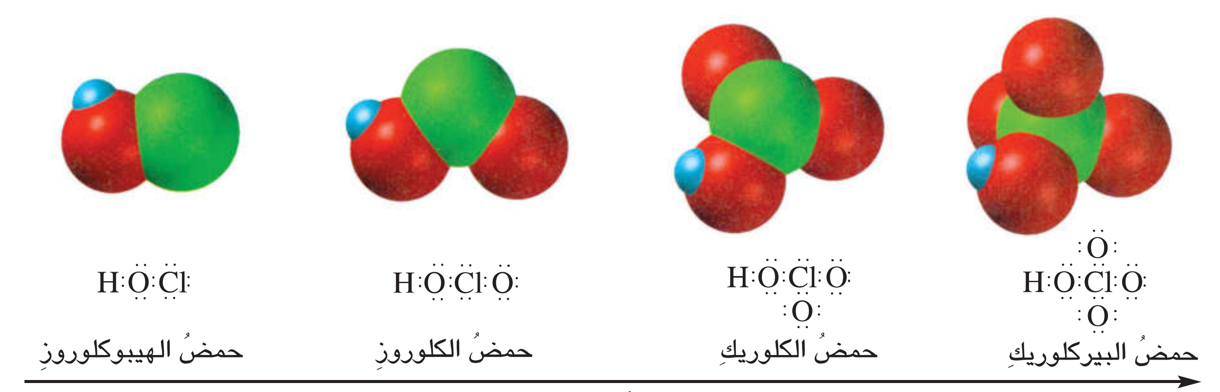
ومع ذلك فالماءُ يعملُ كحمضٍ في التفاعلِ التالي:

$$\underset{\text{قاعدة}_1}{NH_3(g)} + \underset{\text{حمض}_2}{H_2O(l)} \leftrightarrows \underset{\text{حمض}_1}{NH_4^+(aq)} + \underset{\text{قاعدة}_2}{OH^-(aq)}$$

إذن يستطيعُ الماءُ أن يتفاعلَ كحمضٍ أو كقاعدةٍ، فهو بذلك أمفوتيريٌّ. يعتمدُ فعلُ هذا النوعِ من الموادِّ على قوةِ الحمضِ أو القاعدةِ التي تتفاعلُ معه. فمثلاً إذا تفاعلَ الماءُ مع حمضٍ أقوى منه فإنه يسلكُ كقاعدةٍ، أما إذا تفاعلَ مع حمضٍ أضعفَ منه فإنه سيتفاعلُ كحمضٍ، بينما يتفاعلُ الحمضُ الثاني كقاعدةٍ.

وجود $OH-$ في المركَّباتِ الجزيئيَّةِ

المركَّباتُ الجزيئيَّةُ المحتويةُ على مجموعاتِ $OH-$ يمكنُها أن تكونَ حمضيَّةً أو أمفوتيريَّةً. ترتبطُ مجموعةُ $OH-$ تساهميًّا بالحمضِ، وتُسمّى مجموعةَ الهيدروكسيلِ. ولكي تكونَ هذه المركَّباتُ حمضيَّةً يجبُ أن يكونَ جزيءُ الماءِ المتفاعلُ معها قادرًا على جذبِ ذرَّةِ هيدروجينٍ من مجموعةِ الهيدروكسيلِ. ويحدثُ هذا التجاذبُ بصورةٍ أسهلَ كلما كانتِ الرابطة $O–H$ أكثرَ قطبيَّةً. لذلك أيُّ خاصةٍ لجزيءٍ تزيدُ من قطبيَّةِ الرابطةِ $O–H$ تزيدُ في الوقتِ نفسِهِ من حمضيَّةِ المركَّبِ الجزيئيِّ. تقعُ اللافلزّاتُ ذاتُ الحجمِ الصغيرِ في أعلى اليمينِ من الجدولِ الدوريِّ، وهي تتمتَّعُ بسالبيَّةٍ كهربائيَّةٍ عاليةٍ، وتكوِّنُ مركّباتٍ تحتوي على مجموعاتٍ من الهيدروكسيلِ الحمضيَّةِ. جميعُ الأحماضِ الأكسجينيَّةِ هي إلكتروليتاتٌ جزيئيَّةٌ تحتوي على واحدةٍ أو أكثرَ من روابطِ $O–H$. وتتضمّنُ هذه المركَّباتُ أحماضَ الكلوريكِ والبيركلوريكِ.



ازديادُ قوَّةِ الحمضِ

الشكل 3-12 كلُّ حمضٍ من الأحماضِ الأكسجينيَّةِ للكلورِ يحتوي على ذرَّةِ كلورٍ وعلى ذرَّةِ هيدروجينٍ. وتختلفُ فيما بينها بعددِ ذرّاتِها من الأكسجينِ. تجدرُ الإشارةُ إلى أن التغيرَّ في قطبيَّةِ O–H يؤثّرُ على قوةِ الحمضِ. ويمكنُ رؤيةُ هذا التأثير من خلالِ ازديادِ قوةِ الحمضِ، بدءًا بحمضِ الهيبوكلوروزِ وانتهاءً بحمضِ البيركلوريكِ.

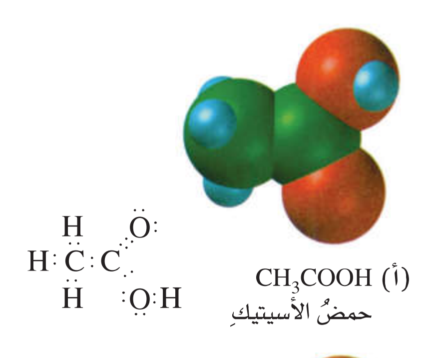
يُظهرُ الشكلُ 3-12 صيغَ الترميزِ النقطيِّ لإلكتروناتِ أحماضِ الكلورِ الأكسجينيَّةِ الأربعةِ. وجديرٌ بالملاحظةِ أن جميعَ ذرّاتِ الأكسجينِ مرتبطةٌ بذرَّةِ الكلورِ، بينما ترتبطُ كل ذرَّةِ هيدروجينٍ بذرَّةِ أكسجينٍ واحدةٍ. ولذلك تعدُّ المحاليلُ المائيَّةُ لهذه الجزيئاتِ أحماضًا، حيث إن روابطَ O–H تتكسرُ عندَما تسحبُ جزيئاتُ الماءِ الهيدروجينَ منها.

يتأثَّرُ سلوكُ المركَّبِ بعددِ ذرّاتِ الأكسجينِ المرتبطةِ بالذرَّةِ المتَّصلةِ بمجموعةِ OH–. فبقدرِ ما يكونُ هذا العددُ كبيرًا تكونُ حمضيَّةُ المركَّبِ كبيرةً. ذرّاتُ الأكسجينِ هذه ذاتُ السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ العاليةِ تسحبُ الكثافةَ الإلكترونيَّةَ بعيدًا عن رابطةِ O–H، مما يزيدُ في قطبيَّتِها. فمثلاً يكوِّنُ الكرومُ ثلاثةَ مركَّباتٍ مختلفةٍ تحتوي على مجموعاتِ OH–، كما هو مبيَّنٌ هنا:

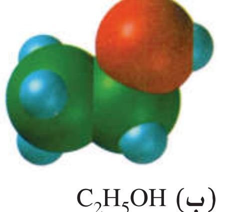
حمضيٌّ	أمفوتيريٌّ	قاعديٌّ
H_2CrO_4	$Cr(OH)_3$	$Cr(OH)_2$
حمضُ الكروميكِ	هيدروكسيدُ الكرومِ (III)	هيدروكسيدُ الكرومِ (II)

يلاحظُ هنا أن حمضيَّةَ المركَّبِ تزدادُ كلما ازدادَ عددُ ذرّاتِ الأكسجينِ فيهِ.

فلنتأمَّلِ المركَّباتِ المبيَّنةَ في الشكلِ 3-13، ففي حمضِ الأسيتيكِ، بخلافِ الإيثانولِ، يوجدُ ذرَّةٌ ثانيةٌ من الأكسجينِ مرتبطةٌ بذرَّةِ الكربونِ المتصلةِ بمجموعةِ OH–، وهذا ما يفسِّرُ سببَ تمتُّعِ حمضِ الأسيتيكِ بالحمضيَّةِ، في حينِ أن الإيثانولَ ليس كذلك، على الرغمِ من أن المركَّبَيْنِ يتكوَّنانِ من العناصرِ نفسِها.



(أ) CH_3COOH حمضُ الأسيتيكِ



(ب) C_2H_5OH الإيثانول

الشكل 3-13 (أ) يتمتعُ الحمض الأسيتي (حمض الأسيتيك) بالحمضيَّةِ، لأن ذرَّةَ الأكسجينِ الثانيةَ المرتبطةَ بذرَّةِ الكربونِ تسحبُ الكثافةَ الإلكترونيَّةَ بعيدًا عن مجموعةِ OH–، مما يزيدُ في قطبيَّةِ رابطةِ O–H. (ب) الإيثانول هو في الأساسِ متعادلٌ، فهو لا يمتلكُ ذرَّةً ثانيةً من الأكسجينِ، وهو بالتالي أقلُّ قطبيَّةً من الحمضِ الأسيتي (حمض الأسيتيك)، وحمضيَّتُهُ أضعفُ بكثيرٍ.

تفاعلاتُ التعادلِ

يوجدُ الكثيرُ من الأمثلةِ الشائعةِ على تفاعلِ مركَباتٍ حمضيَّةٍ مع مركَّباتٍ قاعديَّةٍ حيث يعادلُ الواحدُ منها الآخرَ. فكربوناتُ الصوديومِ الهيدروجينيَّةُ (بيكربوناتُ الصوديوم) $NaHCO_3$، وحمضُ الطرطريكِ $H_2C_4H_4O_6$، هما من مكوِّناتِ مسحوقِ الخبيزِ. وعندَما يتفاعلانِ في المحلولِ ينتجانِ ثنائيَ أكسيدِ الكربونِ. وتصاعدُ ثنائي أكسيدِ الكربون هذا يسبِّبُ انتفاخًا لبعضِ الأطعمةِ، كبعضِ أنواعِ الكعكِ.

تعادلُ الحمضِ القويِّ-القاعدةِ القويَّةِ

يحدثُ تفاعلُ الحمضِ-القاعدةِ في المحلولِ المائيِّ بين حمضِ الهيدروكلوريكِ، بصفتِهِ حمضًا قويًّا يتأيَّنُ بشكلٍ تامٍّ لينتجَ H_3O^+، وبين هيدروكسيدِ الصوديوم بصفتِهِ قاعدةً قويَّةً تتفكَّكُ بشكلٍ تامٍّ لتنتجَ OH^-. وتُكتبُ المعادلةُ لهذا التفاعلِ كما يلي:

$$HCl(aq) + NaOH(aq) \rightarrow NaCl(aq) + H_2O(l)$$

في محلولٍ مائيٍّ يحتوي على 1 mol من هيدروكسيدِ الصوديوم، يتفكَّكُ NaOH تبعًا للمعادلةِ التاليةِ:

$$NaOH(aq) \rightarrow Na^+(aq) + OH^-(aq)$$

وكذلك يتأيَّنُ حمضُ الهيدروكلوريكِ، في محلولٍ يحتوي على 1 mol من هذا الحمضِ، تبعًا للمعادلةِ التاليةِ:

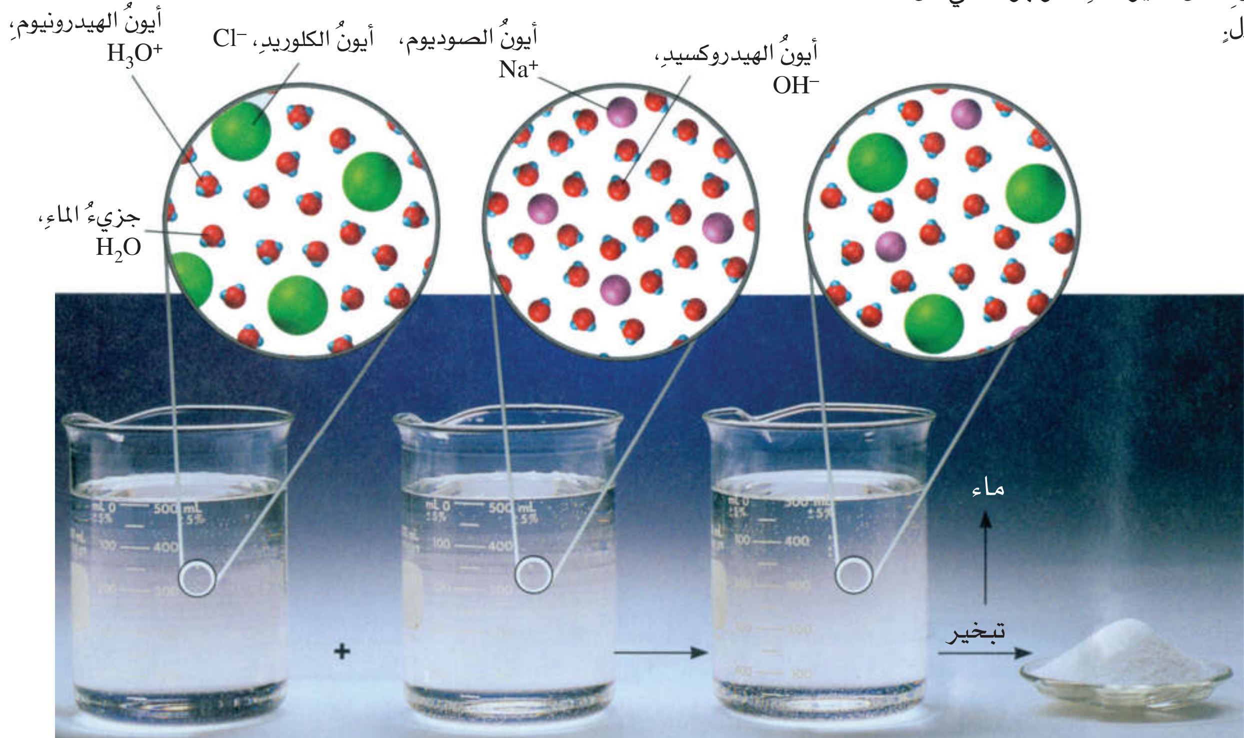
$$HCl(aq) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

إذا تمَّ خلطُ هذين المحلولَيْن، كما هو مبيَّنٌ في الشكل 3-14، يحدثُ تفاعلٌ بينَ الأيوناتِ المائيَّةِ H_3O^+ و OH^-. وينتجُ عن هذا التفاعلِ كلوريدُ الصوديوم NaCl والماءُ. هذا التفاعلُ يتمثَّلُ في المعادلةِ الأيونيَّةِ العامَّةِ كالتالي:

$$H_3O^+(aq) + Cl^-(aq) + Na^+(aq) + OH^-(aq) \rightarrow Na^+(aq) + Cl^-(aq) + 2H_2O(l)$$

وبما أن أيوناتِ الصوديوم Na^+ والكلوريدِ Cl^- تظهرُ في طرفَيِ المعادلةِ الأيونيَّةِ العامَّةِ، فإنها تعتبرُ أيوناتٍ متفرِّجةً، وبالتالي فإن المشاركَيْنِ الوحيدَيْنِ في هذا التفاعل

الشكل 3-14 عندما يتفاعلُ محلولٌ مائيٌّ من حمضِ الهيدروكلوريكِ HCl، مع محلولٍ مائيٍّ من هيدروكسيدِ الصوديوم NaOH، ينتجُ محلولُ كلوريدِ الصوديوم. النماذجُ المبيَّنةُ في هذا الشكلِ تمثِّلُ الأيوناتِ الموجودةَ في كلِّ محلولٍ.



هما أيونُ الهيدرونيوم وأيونُ الهيدروكسيد، كما هو مبيَّنٌ في المعادلةِ الأيونيَّةِ الصرفةِ التاليةِ:

$$H_3O^+(aq) + OH^-(aq) \rightarrow 2H_2O(l)$$

في هذه المعادلةِ يتساوى عددُ أيوناتِ الهيدرونيوم H_3O^+ وعددُ أيوناتِ الهيدروكسيدِ OH^-، وتتحوَّلُ هذه الأيوناتُ بشكلٍ تامٍّ إلى ماءٍ. في المحاليلِ المائيَّةِ، **التعادلُ neutralization** هو ***التفاعلُ الذي يحدثُ بين أيوناتِ الهيدرونيوم وأيوناتِ الهيدروكسيدِ لتكوينِ جزيئاتِ الماءِ.***

وجديرٌ بالملاحظةِ أن الماءَ ليس الناتجَ الوحيدَ في تفاعلِ التعادلِ الذي ينتجُ فيه الملحُ أيضًا. **والملحُ salt** ***هو مركَّبٌ أيونيٌّ يتكوَّنُ من كاتيونِ القاعدةِ وأنيونِ الحمضِ.***

المطرُ الحمضيُّ

ينتجُ عن عمليّاتٍ صناعيَّةٍ كثيرةٍ غازاتٌ مثلُ NO، NO_2، CO_2، SO_2، SO_3. هذه المركَّباتُ تذوبُ في الماءِ المتوفِّرِ في الجوِّ لتنتجَ محاليلَ حمضيَّةً تتساقطُ على الأرضِ بشكلِ أمطارٍ أو ثلوجٍ. فالكبريتُ، مثلاً، يكوِّنُ لدى احتراقِ البترولِ والفحمِ الحجريِّ غازَ ثاني أكسيدِ الكبريتِ SO_2 الذي يتحوَّلُ إلى ثالثِ أكسيدِ الكبريتِ SO_3. وهذا الأكسيدُ يتفاعلُ مع الماءِ المتوافرِ في الجوِّ لينتجَ حمضَ الكبريتيك كما يظهرُ في المعادلةِ التاليةِ:

$$SO_3(g) + H_2O(l) \rightarrow H_2SO_4(aq)$$

الشكل 3-15 الأمطارُ الحمضيَّةُ تسبِّبُ أضرارًا بالغةً في المنحوتاتِ.

مياهُ الأمطارِ عادةً قليلةُ الحمضيَّةِ، لكنها قد تكونُ أحيانًا عاليةَ الحمضيَّةِ فتسمّى أمطارًا حمضيَّةً. يفتتُ المطرُ الحمضيُّ المنحوتاتِ، ويؤثِّرُ في النظامِ البيئيِّ، كمياهِ البيئةِ والغاباتِ. الشكل 3-15 يظهرُ تآكلُ رخامِ هذه المنحوتةِ جرّاءَ الحمضيَّةِ العاليةِ للأمطارِ. وفي سنةِ 1970 وجدَ بعضُ العلماءِ أن المطرَ الحمضيَّ تسبَّبَ في انخفاضِ الثروةِ السمكيَّةِ في البحيراتِ والأنهارِ. وغنيٌّ عن البيانِ القولُ أن زوالَ الثروةِ السمكيَّةِ بشكلٍ تامٍّ في البحيراتِ والأنهارِ، بسببِ المطرِ الحمضيِّ، يؤدي إلى انخفاضٍ في التعدُّدِ البيولوجيِّ للنظامِ البيئيِّ.

مراجعةُ القسم 3-3

1. أكملْ وزنْ معادلاتِ تفاعلاتِ الحمضِ–القاعدةِ التاليةِ:

أ. $H_2CO_3 + Sr(OH)_2 \rightarrow$

ب. $HClO_4 + NaOH \rightarrow$

ج. $HBr + Ba(OH)_2 \rightarrow$

د. $NaHCO_3 + H_2SO_4 \rightarrow$

2. تأمّلِ المعادلةَ التاليةَ بين حمضِ الأسيتيك والماءِ.

$$CH_3COOH + H_2O \leftrightarrows CH_3COO^- + H_3O^+$$

أ. راجعِ الجدولَ 3-6 وقارنْ بين قوتَي الحمضينَ في هذه المعادلةِ. وبينَ قوتَي القاعدتَيْنِ.

ب. حددْ أيُّ اتجاهٍ، الأماميُّ أم العكسيُّ، هو المرجَّحُ للتفاعلِ.

تفكيرٌ ناقدٌ

3. علاقاتٌ استدلاليَّةٌ: اشرحْ كيف يمكنُ لعدَّةِ ذرّاتِ أكسجينٍ موجودةٍ في مركّبٍ يحتوي على مجموعةِ $OH-$ أن تجعلَ منه مركّبًا حمضيًّا.

مراجعةُ الفصل 3

ملخّصُ الفصل

1-3

- تتميَّزُ الأحماضُ بمذاقٍ حامضيٍّ، وتتفاعلُ مع الفلزّاتِ النشيطةِ. تغيِّرُ الأحماضُ ألوانَ كواشفِ الحمضِ–القاعدةِ، وهي تتفاعلُ مع القواعدِ لتنتجَ أملاحًا وماءً، وهي موصِّلةٌ للتيارِ الكهربائيِّ عندما تكونُ في المحاليلِ المائيَّةِ.
- تتميَّزُ القواعدُ بمذاقٍ مرٍّ، كما تُحدثُ ملمسًا صابونيًّا عندَما تكونُ في المحاليلِ المائيَّةِ المخفَّفةِ. وهي تغيِّرُ ألوانَ كواشفِ الحمضِ–القاعدةِ، وتتفاعلُ مع الأحماضِ لتنتجَ الأملاحَ والماءَ، وتوصِّلُ التيارَ الكهربائيَّ في المحلولِ المائيِّ.
- يحتوي حمضُ أرهينيوس على الهيدروجينِ، ويتأيَّنُ في المحلولِ المائيِّ ليكوِّنَ أيوناتِ الهيدروجينِ. أما قاعدةُ أرهينيوس فتنتجُ أيوناتِ الهيدروكسيدِ في المحلولِ المائيِّ.
- تتحدَّدُ قوةُ حمضِ أرهينيوس وقوةُ قاعدةِ أرهينيوس بدرجةِ تأيُّنِها أو تفكُّكِها في المحاليلِ المائيَّةِ.

المفردات

الحمضُ الثنائيُّ (77) binary acid
الحمضُ الأكسجينيُّ (77) oxyacid
حمضُ أرهينيوس (77) Arrhenius acid
قاعدةُ أرهينيوس (77) Arrhenius base
الحمضُ القويُّ (77) strong acid
الحمضُ الضعيفُ (78) weak acid

2-3

- حمضُ برونشتد–لوري هو مانحٌ لبروتونٍ، أما قاعدةُ برونشتد–لوري فمستقبلةٌ لبروتونٍ.
- حمضُ لويس هو مستقبلٌ لزوجٍ من الإلكتروناتِ، أما قاعدةُ لويس فمانحةٌ لزوجٍ من الإلكتروناتِ.
- الأحماضُ يمكنُ أن تكونَ أحاديةَ البروتونِ، أو ثنائيَّةَ البروتونِ، أو ثلاثيَّةَ البروتونِ. وهذ الخاصَّةُ تعتمدُ على عددِ البروتوناتِ التي يمكنُ لجزيءِ الحمضِ أن يمنحَها في المحاليلِ المائيَّةِ. الأحماضُ متعدِّدةُ البروتونِ تتضمَّنُ الأحماضَ ثنائيَّةَ البروتونِ وثلاثيَّةَ البروتونِ.

المفردات

حمضُ برونشتد–لوري (77) Brønsted-Lowry acid
قاعدةُ برونشتد–لوري (77) Brønsted-Lowry base
تفاعلُ الحمضِ–القاعدةِ لبرونشتد–لوري (77) Brønsted-Lowry acid-base reaction
الحمضُ أحاديُّ البروتونِ (78) monoprotic acid
الحمضُ متعدِّدُ البروتونِ (77) polyprotic acid
الحمضُ ثنائيُّ البروتونِ (77) diprotic acid
الحمضُ ثلاثيُّ البروتونِ (77) triprotic acid
حمضُ لويس (77) Lewis acid
قاعدةُ لويس (77) Lewis base
تفاعلُ حمضِ–قاعدةِ لويس (77) Lewis acid-base reaction

3-3

- في كلِّ تفاعلِ حمضٍ–قاعدةٍ من تفاعلاتِ برونشتد–لوري يوجدُ زوجانِ من الأحماضِ والقواعدِ المرافقةِ.
- الحمضُ القويُّ له قاعدةٌ مرافقةٌ ضعيفةٌ، والقاعدةُ القويَّةُ لها حمضٌ مرافقٌ ضعيفٌ.
- التفاعلاتُ القائمةُ على انتقالِ البروتونِ ترجِّحُ إنتاجَ الحمضِ الأضعفِ والقاعدةِ الأضعفِ.
- السلوكُ الحمضيُّ أو القاعديُّ لجزيءٍ يحتوي على مجموعاتِ OH– يعتمدُ على السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ للذرَّةِ الأخرى في هذا الجزيءِ، ويعتمدُ كذلك على عددِ ذرّاتِ الأكسجينِ التي ترتبطُ بالذرّةِ المتَّصلةِ بمجموعةِ OH–.
- ينتجُ تفاعلُ التعادلِ ماءً ومركَّبًا أيونيًّا يُسمّى ملحًا.
- يسبِّبُ المطرُ الحمضيُّ مشاكلَ بيئيَّةً مختلفةً.

المفردات

القاعدةُ المرافقةُ (89) conjugate base
الحمضُ المرافقُ (89) conjugate acid
الأمفوتيريُّ (91) amphoteric
التعادلُ (91) neutralization
الملحُ (91) salt

اختيارٌ من متعدِّد

1. أيُّ خاصةٍ من الخصائصِ التاليةِ لا تميِّزُ الحمضَ؟
أ. يغيِّرُ ألوانَ الكواشفِ.
ب. ينتجُ أيوناتِ OH^-.
ج. يتأيَّنُ في الماءِ.
د. يُنتجُ أيوناتِ الهيدرونيوم في الماءِ.

2. عندما يتفاعلُ حمضٌ ما مع فلزٍّ نشيطٍ
أ. يزدادُ تركيزُ أيونِ الهيدرونيوم.
ب. يكوِّنُ الفلزُّ أنيوناتٍ.
ج. ينتجُ غازُ الهيدروجين.
د. ينتجُ غازُ ثاني أكسيدِ الكربون.

3. أيُّ الأنواعِ التاليةِ من قواعدِ برونشتد-لوري؟
أ. مانحٌ لزوجٍ من الإلكترونات.
ب. مستقبلٌ لزوجٍ من الإلكترونات.
ج. مانحٌ لبروتونٍ.
د. مستقبلٌ لبروتونٍ.

4. أيُّ الأحماضِ التاليةِ هو، بشكلٍ عامٍّ، المركَّبُ الكيميائيُّ الصناعيُّ الأكثرُ إنتاجًا؟
أ. حمضُ الهيدروكلوريك
ب. حمضُ الأسيتيك
ج. حمضُ النيتريك
د. حمضُ الكبريتيك

5. أيُّ الأزواجِ التاليةِ زوجٌ مرافقٌ؟
أ. H^+ و OH^-
ب. NH_2^- و NH_4^+
ج. HCl و Cl^-
د. H_2SO_4 و SO_4^{2-}

6. أيُّ الصيغِ التاليةِ هي صيغةُ حمضِ الأسيتيك؟
أ. CH_3COOH
ب. HNO_3
ج. $HClO_4$
د. HCN

7. أيُّ مما يلي هو الحمضُ المرافقُ لقاعدةٍ مدرجةٍ ضمنَ هذه الخيارات؟
أ. PO_4^{3-}
ب. H_3PO_4
ج. H_2O
د. $H_2PO_4^-$

8. عيِّن هويَّةَ الملحِ الذي يتكوَّنُ عند تفاعلِ محلولِ H_2SO_4 مع محلولِ $Ca(OH)_2$.
أ. كبريتاتُ الكالسيوم
ب. هيدروكسيدُ الكالسيوم
ج. أكسيدُ الكالسيوم
د. فوسفاتُ الكالسيوم

9. أيُّ العباراتِ التاليةِ تصلحُ لهذا التفاعلِ؟

$$HF(aq) + HPO_4^{2-}(aq) \rightarrow F^-(aq) + H_2PO_4^-(aq)$$

أ. HF هو القاعدةُ
ب. HPO_4^{2-} هو الحمضُ
ج. F^- هو القاعدةُ المرافقةُ
د. $H_2PO_4^-$ هو القاعدةُ المرافقةُ

مراجعةُ المفاهيم

10. قارنْ بينَ الخصائصِ العامَّةِ للأحماضِ والخصائصِ العامَّةِ للقواعدِ.

11. أ. ميِّزْ بينَ العناصرِ المكوِّنةِ للأحماضِ الثنائيَّةِ والأحماضِ الأكسجينيَّةِ، وطرقِ تسميتها.
ب. أعطِ ثلاثةَ أمثلةٍ على كلِّ نوعٍ من أنواعِ الأحماضِ.

12. اذكرْ خمسةَ أحماضٍ شائعةٍ تُستخدمُ في الصناعةِ، واذكرْ خصائصَها المميِّزةَ، وأهمَّ استخداماتِها.

13. أ. ماذا يميِّزُ الأحماضَ القويَّةَ عن الأحماضِ الضعيفةِ؟
ب. أعطِ مثالَيْن على كلٍّ من الأحماضِ القويَّةِ والأحماضِ الضعيفةِ.

14. أ. ما الذي يحدِّدُ قوَّةَ قاعدةِ أرهينيوس؟
ب. أعطِ مثالَيْن على المحاليلِ المائيَّةِ لقاعدةٍ قويَّةٍ وآخرَ لقاعدةٍ ضعيفةٍ.

15. ما الفرقُ بين الحمضِ أحاديِّ البروتونِ والحمضِ ثنائيِّ البروتونِ والحمضِ ثلاثيِّ البروتون. أعطِ مثالاً على كلٍّ منها.

16. أيٌّ من تعريفاتِ الحمضِ الثلاثةِ هو الأشملُ؟ فسِّرْ ذلك.

17. مستعينًا بالمعادلاتِ، وضِّحْ ما المقصودُ بكلٍّ مما يلي:
أ. قاعدةٍ مرافقةٍ.
ب. حمضٍ مرافقٍ.

18. أ. ما العلاقةُ بين قوّةِ حمضٍ وقوّةِ قاعدتِهِ المرافقةِ؟
ب. ما العلاقةُ بين قوّةِ قاعدةٍ وقوّةِ حمضِها المرافقِ؟

19. أ. وضحِ المقصودَ بالمركَّبِ الأمفوتيريِّ.
ب. أعطِ مثالاً على مادةٍ أو أيونٍ ذي خصائصَ أمفوتيريَّةٍ.

20. حدِّدْ هويةَ مانحِ البروتونِ (الحمض)، ومستقبلِ البروتونِ (القاعدةِ) في كلٍّ من التفاعلاتِ التاليةِ، وعيِّنِ الأزواجَ المرافقةَ.

أ. $CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$

ب. $HCO_3^-(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_2CO_3(aq) + OH^-(aq)$

ج. $HNO_3 + SO_4^{2-} \rightarrow HSO_4^- + NO_3^-$

21. استخدمِ المعلوماتِ المعطاةَ في الجدول 3-6 لتحدِّدَ أيٌّ من هذه الأحماضِ HF، H_2S، HNO_3، CH_3COOH، هو:

أ. الحمضُ الأقوى.

ب. الحمضُ الأضعفُ.

ج. القاعدةُ المرافقةُ الأقوى بين القواعدِ الأربعِ المرافقةِ الناتجةِ من الأحماضِ المذكورةِ هنا.

د. القاعدةُ المرافقة الأضعفُ بين القواعدِ الأربعِ المرافقةِ الناتجةِ من الأحماضِ المذكورةِ هنا.

22. علِّلْ كلاً مما يلي:

أ. القاعدةُ المرافقةُ للحمضِ القويِّ هي قاعدةٌ ضعيفةٌ، والحمضُ المرافقُ للقاعدةِ القويَّةِ هو حمضٌ ضعيفٌ.

ب. حمضُ الفوسفوريكِ H_3PO_4 تحتوي صيغتُهُ على ثلاثِ ذرّاتِ هيدروجين، وهو مصنَّفٌ كحمضٍ ثلاثيِّ البروتون. حمضُ الأسيتيكِ CH_3COOH تحتوي صيغتُهُ على أربعِ ذراتِ هيدروجين، وهو مصنَّفٌ كحمضٍ أحاديِّ البروتون.

ج. بالرغمِ من أن $HCl(aq)$ يظهرُ الخصائصَ المميِّزةَ لحمضِ أرهينيوس فإن غازَ HCl النقيَّ و HCl الذائبَ في مذيباتٍ غيرِ قطبيَّةٍ، لا يُظهرانِ أيًّا من هذه الخصائص.

د. H_3PO_4 الذي يحتوي على ثلاثِ ذرّاتٍ من الهيدروجينِ في كلِّ جزيءٍ هو حمضٌ ضعيفٌ، بينما HCl الذي يحتوي على ذرّةٍ واحدةٍ من الهيدروجينِ هو حمضٌ قويٌّ.

مسائل

23. سمِّ كلاً من الحمضَيْنِ الثنائيَّيْنِ التاليَيْنِ:

أ. HCl

ب. H_2S

24. سمِّ كلاً من الأحماضِ الأكسجينيَّةِ التاليةِ:

أ. HNO_3

ب. H_2SO_3

ج. $HClO_3$

د. HNO_2

25. اكتبْ صيغتَي الحمضَيْنِ الثنائيَّيْنِ التاليَيْنِ:

أ. حمضِ الهيدروفلوريكِ

ب. حمضِ الهيدرويوديكِ

26. اكتبْ صيغَ الأحماضِ الأكسجينيَّةِ التاليةِ:

أ. حمضِ البيربروميكِ

ب. حمضِ الكلوروز

ج. حمضِ الفوسفوريكِ

د. حمضِ الهيبوكلوروز

27. أ. اكتبِ المعادلاتِ الموزونةَ التي تصفُ خطوتَيْ تأيُّنِ حمضِ الكبريتيكِ في محلولٍ مائيٍّ مخفَّفٍ.

ب. قارنْ بين درجاتِ التأيُّنِ لكلٍّ من خطوتَيِ التأيُّنِ لحمضِ الكبريتيكِ.

28. في حالِ مزجِ كمّيَّتَيْنِ متعادلتَيْنِ كيميائيًّا من محلولَيْ $HCl(aq)$ و $KOH(aq)$، اكتبِ التالي:

أ. المعادلةَ بالصيغِ لهذا التفاعلِ.

ب. المعادلةَ الأيونيَّةَ العامَّةَ.

ج. المعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ.

29. أعدِ المسألةَ رقمَ 28 في حالِ مزجِ $H_3PO_4(aq)$ و $NaOH(aq)$.

30. اكتبِ المعادلةَ بالصيغِ والمعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ لكلٍّ من التفاعلَيْنِ التاليَيْنِ.

أ. $Zn(s) + HCl(aq) \rightarrow$

ب. $Al(s) + H_2SO_4(aq) \rightarrow$

31. اكتبِ المعادلةَ بالصيغِ والمعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ للتفاعلِ بينَ $Ca(s)$ و $HCl(aq)$.

32. أكملْ تفاعلاتِ التعادلِ التاليةَ. وزِنْ كلَّ تفاعلٍ، ثم اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ العامَّةَ والمعادلةَ الأيونيَّةَ الصرفةَ لكلٍّ منها:

أ. $HCl(aq) + NaOH(aq) \rightarrow$

ب. $HNO_3(aq) + KOH(aq) \rightarrow$

ج. $Ca(OH)_2(aq) + HNO_3(aq) \rightarrow$

د. $Mg(OH)_2(aq) + HCl(aq) \rightarrow$

33. اكتبِ المعادلة بالصيغ والمعادلة الأيونيَّة العامَّة والمعادلة الأيونيَّة الصرفة، لتفاعلِ التعادلِ بين المحلولَيْن المائيَّيْن لكلٍّ من حمض الفوسفوريكِ H_3PO_4 وهيدروكسيد المغنيسيوم $Mg(OH)_2$. افترضْ أن المحاليلَ مخفَّفةٌ بشكلٍ كافٍ بحيث لا تتكوَّنُ أيُّ ترسبات.

34. اكتبِ المعادلة الموزونة لكلٍّ من التفاعلاتِ التاليةِ بين الماءِ وأكسيدِ اللافلزِّ، لإنتاجِ حمض:

أ. $CO_2(g) + H_2O(l) \rightarrow$

ب. $SO_3(g) + H_2O(l) \rightarrow$

ج. $N_2O_5(g) + H_2O(l) \rightarrow$

35. اكتبِ المعادلة بالصيغ والمعادلة الأيونيَّة العامَّة والمعادلة الأيونيَّة الصرفة، لتفاعلاتِ التعادلِ التي يمكنُها أن تنتجَ كلاًّ من الأملاحِ التالية:

أ. $RbClO_4$ ج. $CaCl_2$

ب. $BaSO_4$ د. K_2SO_4

مراجعةٌ متنوِّعة

36. مفترضًا أننا مزجْنا كمِّيّاتٍ متعادلةً كيميائيًّا من محاليلَ مخفَّفةٍ للحمضِ $HNO_3(aq)$ وللقاعدةِ $LiOH(aq)$، اكتبْ للتفاعلِ ما يلي:

أ. المعادلةَ بالصيغ.

ب. المعادلةَ الأيونية العامَّة.

ج. المعادلةَ الأيونيَّة الصرفة.

37. اكتبِ المعادلةَ الكيميائيَّةَ الموزونةَ للتفاعلِ بين حمضِ الهيدروكلوريكِ وفلزِّ المغنيسيوم.

38. اكتبِ المعادلاتِ لخطواتِ التأيُّنِ الثلاثِ التابعةِ لحمضِ الفوسفوريكِ H_3PO_4. قارنْ بين درجاتِ التأيُّنِ لهذه الخطواتِ الثلاث.

39. سمِّ أو أعطِ الصيغةَ الجزيئيَّةَ لكلٍّ من الأحماضِ التالية:

أ. HF

ب. حمض الأسيتيك

ج. حمض الفوسفوروز

د. $HClO_4$

هـ. H_3PO_4

و. حمض الهيدروبروميك

ز. HClO

ح. H_2CO_3

ط. حمض الكبريتيك

تفكيرٌ ناقد

40. **تحليلُ نتائج:** في القرنِ الثامنَ عشرَ، أجرى أنطوان لافوازييه تجاربَ على أكاسيدَ مثل CO_2، SO_2. ولاحظَ أن هذه الأكاسيدَ تكوِّنُ محاليلَ حمضيَّةً. فاستنتجَ من ملاحظاتِهِ أن المادَّةَ يجبُ أن تحتويَ على الأكسجينِ لكي تُظهِرَ سلوكًا حمضيًّا. أما اليومَ فيبدو أن هذا الاستنتاجَ ليسَ صحيحًا. أعطِ براهينَ تدحضُ استنتاجَ لافوازييه.

بحثٌ وكتابة

41. اشرحْ كيف يُستخدَمُ إنتاجُ حمضِ الكبريتيكِ مقياسًا لاقتصادِ بلدٍ ما. اكتبْ تقريرًا عن المعلوماتِ التي وجدتَها.

مشروعٌ علمي

42. نفِّذْ مشروعًا علميًّا بعنوان «استقصاءُ مدى جودةِ مضاداتِ حموضةِ المعدةِ المتوافرةِ في الصيدليّات».

الفصـــل 4

معايرةُ الحمضِ-القاعدةِ والرقمُ الهيدَروجينيُّ

للرقمِ الهيدروجينيِّ أهمّيَّةٌ كبرى في حياةِ الكائناتِ

القســـم 1-4

المحاليلُ المائيَّةُ ومفهومُ الرقمِ الهيدروجيني

مؤشراتُ الأداءِ

- يصفُ عمليةَ التأيُّنِ الذاتيِّ للماءِ.
- يُعرِّفُ الرقمَ الهيدروجينيَّ ويحدِّدُ قيمتَهُ في محلولٍ متعادلٍ عند درجةِ حرارةِ 25°C.
- يفسِّرُ سلّمَ الرقمِ الهيدروجينيِّ مبيِّنًا كيفيةَ استخدامِهِ.
- يحسبُ الرقمَ الهيدروجينيَّ مستخدمًا $[H_3O^+]$ أو $[OH^-]$.
- يحسبُ $[H_3O^+]$ أو $[OH^-]$ مستخدمًا الرقمَ الهيدروجينيَّ.

أيوناتُ الهيدرونيومِ وأيوناتُ الهيدروكسيدِ

تبيَّنَ لك من دراستِكَ السابقةِ أن الأحماضَ تكوِّنُ في المحاليلِ المائيَّةِ أيوناتِ الهيدرونيوم، بينما تكوِّنُ القواعدُ أيوناتِ الهيدروكسيدِ. إنما مصدرُ هذه الأيوناتِ لا يقتصرُ على المذابِ في المحلولِ المائيِّ، إذ يمكنُ أيضًا للمذيبِ، أي الماءِ، أن يزوِّدَ المحلولَ بأيوناتِ الهيدرونيومِ والهيدروكسيدِ.

التأيُّنُ الذاتيُّ للماءِ

أظهرَتْ تجاربُ التوصيلِ الكهربائيِّ الدقيقةُ أن الماءَ النقيَّ إلكتروليتٌ ضعيفٌ للغاية. فالماءُ يتأيَّنُ ذاتيًّا، كما في الشكل 1-4 . **وفي عمليةِ التأيُّنِ الذاتيِّ للماءِ self-ionization of water *يُنتِجُ جزيئا ماءٍ أيونَ هيدرونيومٍ وأيونَ هيدروكسيد، وذلك بانتقالِ بروتونٍ،*** تبعًا للاتزانِ التالي:

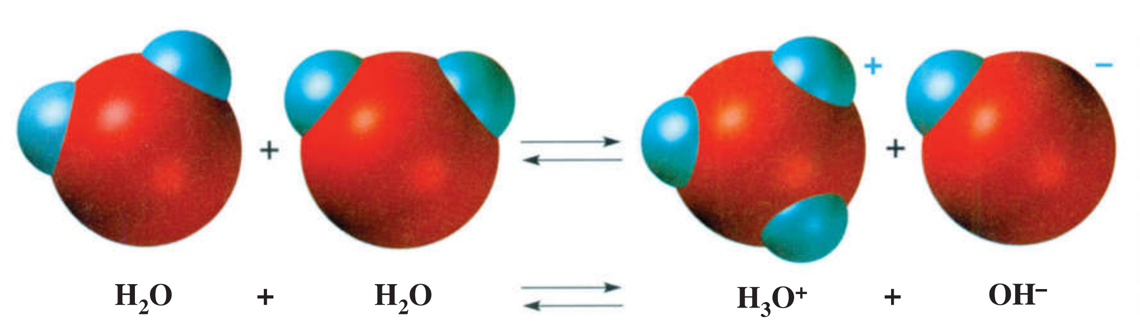
$$H_2O(l) + H_2O(l) \rightleftharpoons H_3O^+(aq) + OH^-(aq)$$

وأظهرتْ قياساتُ التوصيلِ أن تركيزَ كلٍّ من H_3O^+ و OH^- في الماءِ النقيِّ يبلغُ 1.0×10^{-7} mol/L عند درجةِ حرارةِ 25°C.

ويُعتمَدُ الترميزُ القياسيُّ لتمثيلِ التركيزِ بـ mol/L، وذلك بوضعِ صيغةِ الأيونِ أو الجزيءِ المُعيّنِ بين قوسَينِ مربَّعَين [ ]. فالرمزُ $[H_3O^+]$، على سبيلِ المثالِ، يَعني «تركيزَ أيونِ الهيدرونيومِ مقيسًا بـ mol/L»، أو «تركيزَ أيونِ الهيدرونيومِ المولاريِّ». وفي الماءِ، عند درجةِ حرارةِ 25°C، تركيزُ H_3O^+ يساوي تركيزَ OH^-، ويساوي 1.0×10^{-7} M.

وتبقى النتيجةُ الرياضيَّةُ، لحاصلِ ضربِ $[H_3O^+]$ في $[OH^-]$، ثابتةً في كلٍّ من الماءِ

الشكل 1-4 يتأيَّنُ الماءُ ذاتيًّا بقدرٍ قليل، حيث ينتقلُ بروتونٌ من جزيءِ ماءٍ إلى آخرَ. وينتجُ عن ذلك أيونُ الهيدرنيومِ H_3O^+، وأيونُ الهيدروكسيدِ OH^-.



الجدول 1-4 قيمةُ ثابتِ تأيُّنِ الماءِ K_w عند درجاتِ حرارةٍ مختارةٍ.

درجةُ الحرارةِ (ºC)	K_w
0	1.2×10^{-15}
10	3.0×10^{-15}
25	1.0×10^{-14}
50	5.3×10^{-14}

والمحاليلِ المائيَّةِ المخفَّفةِ، عند درجةِ حرارةٍ ثابتةٍ. يسمّى الحاصلُ الرياضيُّ هذا ثابتَ تأيُّنِ الماءِ، K_w، ويمثَّلُ بالمعادلةِ التاليةِ:

$$K_w = [H_3O^+][OH^-]$$

وعلى سبيلِ المثالِ، تحسبُ قيمةُ هذا الثابتِ في الماءِ والمحاليلِ المائيَّةِ المخفَّفةِ، عند درجةِ حرارةِ 25ºC، بتطبيقِ العلاقةِ التاليةِ:

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = (1.0 \times 10^{-7})(1.0 \times 10^{-7}) = 1.0 \times 10^{-14}$$

يزدادُ تأيُّنُ الماءِ بزيادةِ درجةِ الحرارةِ. وتبعًا لذلك، يزدادُ ثابتُ تأيُّنِ الماءِ K_w هو الآخرُ بزيادةِ درجةِ الحرارةِ، كما في الجدولِ 1-4. إلا أن قيمةَ K_w هي دائمًا ثابتةٌ عند درجةِ حرارةٍ معينةٍ. لذلك فإن قيمةَ ثابتِ تأيُّنِ الماءِ، K_w، التي تساوي 1.0×10^{-14} هي قيمةٌ ثابتةٌ عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ.

المحاليلُ المتعادلةُ والحمضيَّةُ والقاعديَّةُ

بما أن تركيزَيْ أيونِ الهيدرونيومِ وأيونِ الهيدروكسيدِ متساويانِ في الماءِ النقيِّ، فالماءُ متعادلٌ. وفي الحقيقةِ، أيُّ محلولٍ يتساوى فيه تركيزا هذَينِ الأيونَينِ يكونُ متعادلاً. ولعلك تذكرُ من دراستِنا في الفصلِ السابقِ أن الحمضَ يزيدُ تركيزَ أيونِ الهيدرونيومِ H_3O^+ في المحاليلِ المائيَّةِ، كما يظهرُ في الشكلِ 2-4أ. فالمحاليلُ التي يكونُ فيها $[H_3O^+]$ أكبرَ من $[OH^-]$ تُعتبرُ حمضيَّةً. ومن ناحيةٍ ثانيةٍ تزيدُ القاعدةُ من تركيزِ OH^- في المحاليلِ المائيَّةِ، كما يظهرُ في الشكلِ 2-4ب. ويكونُ $[OH^-]$ في المحاليلِ القاعديَّةِ أكبرَ من $[H_3O^+]$.

لذلك، وكما ذُكرَ سابقًا، يكونُ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ متساويَينِ في المحاليلِ المتعادلةِ عند درجةِ حرارةِ 25ºC. وتكونُ قيمةُ كلٍّ منهما 1.0×10^{-7} M. وبناءً عليه، إذا زادَ $[H_3O^+]$ عن 1.0×10^{-7} M، يتحوَّلُ المحلولُ إلى محلولٍ حمضيٍّ. فالمحلولُ الذي يحتوي لترٌ منه على 1.0×10^{-5} mol من أيوناتِ H_3O^+ عند درجةِ حرارةِ 25ºC، يكونُ حمضيًّا، لأن 1.0×10^{-5} أكبرُ من 1.0×10^{-7}. وعلى عكسِ ذلك، إذا ازدادَ $[OH^-]$ إلى أكثرَ من 1.0×10^{-7} M يصبحُ المحلولُ قاعديًّا. فالمحلولُ الذي يحتوي لترٌ منه على 1.0×10^{-4} mol من أيوناتِ OH^- عند درجةِ حرارةِ 25ºC يكونُ قاعديًّا، لأن 1.0×10^{-4} أكبرُ من 1.0×10^{-7}.

(أ)

(ب)

الشكل 2-4 (أ) يزدادُ تركيزُ H_3O^+ بإضافةِ الثلجِ الجافِّ (ثنائي أكسيدِ الكربونِ) إلى الماءِ. وعلامةُ ذلك تغيُّرُ لونِ الكاشفِ، أزرقِ البروموثيمول، إلى الأصفرِ. ويتكوّنُ الضبابُ الأبيضُ عند تكثُّفِ بخارِ الماءِ، لأن الثلجَ الجافَّ باردٌ. (ب) يزدادُ تركيزُ OH^- بإضافةِ بيروكسيدِ الصوديومِ إلى الماءِ. وعلامةُ ذلك تغيُّرُ لونِ الكاشفِ، الفينولفثالينِ، إلى اللونِ الزهريِّ.

حسابُ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$

درستَ سابقًا أن الأحماضَ والقواعدَ القويَّةَ تتأيَّنُ أو تتفكَّكُ في المحاليلِ المائيَّةِ المخفَّفةِ بشكلٍ تامٍّ. في الجدولِ 4-2 تجدُ قائمةً بأسماءِ قواعدَ وأحماضٍ قويَّةٍ. وبما أن NaOH قاعدةٌ قويَّةٌ فإن 1 mol منه يعطي مولاً واحدًا من أيوناتِ OH^- في المحلولِ المائيِّ.

$$\underset{1\ mol}{NaOH(s)} \xrightarrow{H_2O} \underset{1\ mol}{Na^+(aq)} + \underset{1\ mol}{OH^-(aq)}$$

إذن في محلولِ NaOH 1.0×10^{-2} M يكونُ $[OH^-]$ مساويًا لـ 1.0×10^{-2} M.
لاحظْ أن $[OH^-]$ أكبرُ من 1.0×10^{-7} M. فلذلك هذا المحلولُ قاعديٌّ.
وحيث إن قيمةَ K_w للمحلولِ المائيِّ ثابتةٌ نسبيًّا 1.0×10^{-14} عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ، فإن تركيزَ أيٍّ من الأيونَين، يمكنُ تحديدُهُ إذا عُرِفَتْ قيمةُ تركيزِ الأيونِ الآخرِ. ويحسبُ $[H_3O^+]$ في هذا المحلولِ كالتالي:

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$[H_3O^+] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[OH^-]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{1.0 \times 10^{-2}} = 1.0 \times 10^{-12}\ M$$

في المثالِ السابقِ تكونُ قيمةُ $[OH^-]$ أكبرَ من قيمةِ $[H_3O^+]$، كما هي الحالُ في أيِّ محلولٍ قاعديٍّ.
ولنأخذِ الآنَ محلولَ HCl 2.0×10^{-4} M. فبما أن HCl حمضٌ قويٌّ، فإن $[H_3O^+]$ يساوي 2.0×10^{-4} M، كما يتضحُ مما يلي:

$$\underset{1\ mol}{HCl(g)} + \underset{1\ mol}{H_2O(l)} \rightarrow \underset{1\ mol}{H_3O^+(aq)} + \underset{1\ mol}{Cl^-(aq)}$$

لاحظْ أن $[H_3O^+]$ أكبرُ من 1.0×10^{-7} M. فلذلك، هذا المحلولُ حمضيٌّ. وتحسبُ $[OH^-]$ لهذا المحلولِ كالتالي:

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$[OH^-] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[H_3O^+]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{2.0 \times 10^{-4}} = 5.0 \times 10^{-10}\ M$$

إن قيمةَ $[H_3O^+]$ أكبرُ من $[OH^-]$، في المحاليلِ الحمضيَّةِ كافَّةً.
لذلك، ولكي تبقى قيمةُ K_w ثابتةً، فإن أيَّ زيادةٍ في $[H_3O^+]$ أو في $[OH^-]$ في المحلولِ المائيِّ تسبِّبُ نقصًا في تركيزِ الأيونِ الآخرِ. وتوضحُ المسألةُ النموذجيَّةُ 4-1 عمليَّةَ حسابِ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ لمحلولٍ حمضيٍّ.

الجدول 4-2 أحماضٌ وقواعدُ قويةٌ شائعةٌ

حمضٌ قويٌّ	قاعدةٌ قويَّةٌ
HCl	LiOH
HBr	NaOH
HI	KOH
$HClO_4$	RbOH
$HClO_3$	CsOH
HNO_3	$Ca(OH)_2$
H_2SO_4	$Sr(OH)_2$
	$Ba(OH)_2$

مسألةٌ نموذجية 1-4

تمَّ في إحدى التجاربِ المختبريَّةِ تحضيرُ محلولِ حمضِ نيتريكٍ تركيزُه 1.0×10^{-4} M.

أ. احسبْ $[H_3O^+]$ في المحلولِ. ب. احسبْ $[OH^-]$ في المحلولِ.

الحلّ

1 حلِّل

المعطى: تركيزُ المحلولِ = 1.0×10^{-4} M HNO_3

المجهول: أ. $[H_3O^+]$

ب. $[OH^-]$

2 خطِّطْ

HNO_3 حمضٌ قويٌّ، وهذا يعني أنه يتأيَّنُ تأيُّنًا تامًّا (100%) في المحاليلِ المخفَّفةِ، وأن كلَّ جزيءِ حمضٍ يعطي أيونَ هيدرونيومٍ. وعليه، يكونُ تركيزُ أيوناتِ الهيدرونيوم في المحلولِ مساويًا لتركيزِ الحمضِ. وبما أن مقدارَ K_w ثابتٌ، يصبحُ من السهلِ إيجادُ $[OH^-]$ باستعمالِ قيمةِ $[H_3O^+]$، كالتالي:

أ.
$$\underset{1\ mol}{HNO_3(l)} + \underset{1\ mol}{H_2O(l)} \rightarrow \underset{1\ mol}{H_3O^+(aq)} + \underset{1\ mol}{NO_3^-(aq)}$$

$$\text{مولاريَّةُ } HNO_3 = \frac{mol\ HNO_3}{1\ L\ \text{محلول}}$$

$$\text{مولاريَّةُ } H_3O^+ = \frac{mol\ H_3O^+}{1\ L\ \text{محلول}} = \frac{\cancel{mol\ HNO_3}}{1\ L\ \text{محلول}} \times \frac{1\ mol\ H_3O^+}{1\ \cancel{mol\ HNO_3}}$$

ب.
$$[OH^-][H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$[OH^-] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[H_3O^+]}$$

3 احسبْ

أ.
$$\frac{1.0 \times 10^{-4}\ \cancel{mol\ HNO_3}}{1\ L\ \text{محلول}} \times \frac{1\ mol\ H_3O^+}{1\ \cancel{mol\ HNO_3}} = \frac{1.0 \times 10^{-4}\ mol\ H_3O^+}{1\ L\ \text{محلول}} = 1.0 \times 10^{-4}\ M\ H_3O^+$$

ب.
$$[OH^-] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[H_3O^+]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{1.0 \times 10^{-4}} = 1.0 \times 10^{-10}\ M$$

4 قيِّمْ

$[H_3O^+]$ يساوي 1.0×10^{-4}، فهو أكبرُ من 1.0×10^{-7} لذلك يكونُ $[OH^-]$ أقلَّ من 1.0×10^{-7}. والجوابُ تمَّ التعبيرُ عنه بصورةٍ صحيحةٍ إلى رقمَينِ معنويَّين.

تمارينُ تطبيقية

1. احسبْ تركيزَيْ أيونَي الهيدرونيومِ والهيدروكسيدِ في محلولِ 1×10^{-4} M HCl.

2. احسبْ تركيزَيْ أيونَي الهيدرونيومِ والهيدروكسيدِ في محلولِ 1.0×10^{-3} M HNO_3.

3. احسبْ تركيزَيْ أيونَي الهيدرونيومِ والهيدروكسيدِ في محلولِ 3.0×10^{-2} M NaOH.

4. احسبْ تركيزَيْ أيونَي الهيدرونيومِ والهيدروكسيدِ في محلولِ 1.0×10^{-4} M $Ca(OH)_2$.

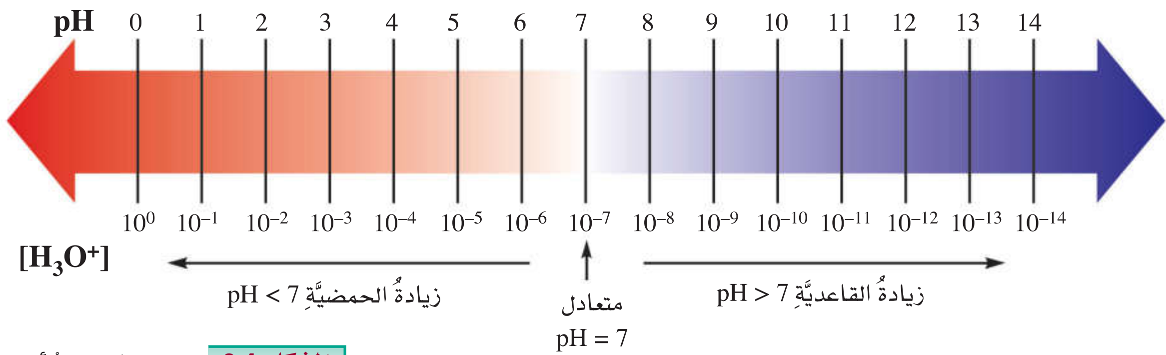
الجواب

1. $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-4}$ M، $[OH^-] = 1 \times 10^{-10}$ M

2. $[H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-3}$ M، $[OH^-] = 1.0 \times 10^{-11}$ M

3. $[H_3O^+] = 3.3 \times 10^{-13}$ M، $[OH^-] = 3.0 \times 10^{-2}$ M

4. $[H_3O^+] = 5.0 \times 10^{-11}$ M، $[OH^-] = 2.0 \times 10^{-4}$ M



الشكل 3-4 كلما زادَ تركيزُ أيونِ الهيدرونيوم تزدادُ حمضيَّةُ المحلولِ ويقلُّ pH. وكلما قلَّ تركيزُ أيونِ الهيدرونيوم تزدادُ قاعديَّةُ المحلولِ ويزدادُ pH.

سُلَّمُ الرقمِ الهيدروجينيِّ (pH)

التعبيرُ عن حمضيَّةِ محلولٍ أو قاعديَّتِهِ وفقًا لتركيزِ H_3O^+ أو OH^- قد لا يكونُ عمليًّا، وذلك لصغرِ القيمِ الرقميَّةِ لهذَينِ التركيزَين. إن الكميةَ الأنسبَ للتعبيرِ عن ذلك تسمّى الرقمَ الهيدروجينيَّ أو pH، وهو يشيرُ أيضًا إلى تركيزِ أيونِ الهيدرونيومِ في المحلول. يمثِّلُ الحرفانِ pH مطلعي الكلمتَينِ الفرنسيتَينِ pouvoir hydrogène، وتعني «قوةَ الهيدروجين». ***يُعرَّفُ الرقمُ الهيدروجينيُّ pH للمحلولِ بأنه سالبُ اللوغاريتمِ للأساسِ 10 لتركيزِ أيونِ الهيدرونيوم***، $[H_3O^+]$. ويُعبَّرُ عن pH بالمعادلةِ التاليةِ:

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

اللوغاريتمُ للأساسِ 10 لعددٍ معيَّنٍ هو الأسُّ الذي يُرفَعُ به الرقمُ 10 ليصبحَ مساويًا للعددِ. يكونُ تركيزُ أيونِ الهيدرونيومِ في محلولٍ متعادلٍ (عند درجةِ حرارةِ 25°C) مساويًا لـ 1×10^{-7} M، واللوغاريتمُ لهذا العددِ هو 7.0–. وتُحدَّدُ قيمةُ pH كالتالي:

$$pH = -\log [H_3O^+] = -\log (1 \times 10^{-7}) = -(-7.0) = 7.0$$

العلاقةُ بين pH و $[H_3O^+]$ مبيَّنةٌ على سلَّمٍ في الشكل 3-4.

وبالطريقةِ ذاتِها، ***يعرَّفُ الرقمُ الهيدروكسيديُّ pOH للمحلولِ على أنه سالبُ اللوغاريتمِ للأساسِ 10 لتركيزِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ***، $[OH^-]$.

$$pOH = -\log [OH^-]$$

يبلغُ تركيزُ OH^- في محلولٍ متعادلٍ 1×10^{-7} M عند درجةِ حرارةِ 25°C. لذا يكونُ: pOH = 7.0.

تذكَّرْ أن العلاقةَ بين قيمتَيْ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ تحدِّدُها K_w، وأن قيمةَ سالبِ لوغاريتمِ K_w هي 14.0، لأن $K_w = 1 \times 10^{-14}$ عند درجةِ حرارةِ 25°C. ولعلكَ لاحظتَ أن مجموعَ قيمتَيْ pH و pOH لمحلولٍ متعادلٍ عند درجةِ حرارةِ 25°C يساوي 14.0 هو الآخرُ. فإذن العلاقةُ التاليةُ صحيحةٌ عند درجةِ حرارةِ 25°C.

$$pH + pOH = 14.0$$

إن مدى قيمِ pH للمحاليلِ المائيَّةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C تتراوحُ، بصورةٍ عامَّةٍ، بين 0 و 14، كما يظهرُ في الجدولِ 3-4.

الجدول 3-4 مدى قيمِ pH التقريبيَّةِ لبعضِ الموادِّ الشائعةِ الاستعمالِ (عند درجةِ حرارةِ 25°C)

المادة	pH	المادة	pH
العصارةُ المعِديَّةُ	3.0-1.0	الخبزُ	6.0-5.0
عصيرُ الليمونِ	2.4-1.8	ماءُ المطرِ	5.8-5.5
الخلُّ	3.4-2.4	البطاطا	6.0-5.6
المشروباتُ الغازيَّةُ	4.0-2.0	الحليبُ	6.6-6.3
التفاحُ	3.3-2.9	اللعابُ	7.5-6.5
الجريبُ فروت	3.4-2.9	الماءُ النقيُّ (المقطَّر)	7.0
البرتقالُ	4.0-3.0	الدمُ	7.5-7.3
التوتُ	4.7-3.2	البيضُ	8.0-7.6
الطماطمُ	4.4-4.0	ماءُ البحرِ	8.5-8.0
الموزُ	5.7-4.5	حليبُ المغنيسيا	10.5

لنفترضْ أن $[H_3O^+]$ في محلولٍ معيَّنٍ أكبرُ من $[OH^-]$، كما هي الحالُ في المحاليلِ الحمضيَّةِ. على سبيلِ المثالِ، $[H_3O^+]$ في محلولٍ حمضيٍّ عند درجةِ حرارةِ 25°C يساوي 1×10^{-6} M، عندها يكونُ pH للمحلولِ مساويًا لـ 6.0، وفقًا لما يلي:

$$pH = -\log [H_3O^+] = -\log (1 \times 10^{-6}) = -(-6.0) = 6.0$$

إن pH هذا المحلولِ أصغرُ من 7.0. وهذه هي الحالُ في جميعِ المحاليلِ الحمضيَّةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C. وتبينُ الحساباتُ التاليةُ أن pOH أكبرُ من 7.0، كما هي الحالُ في جميعِ المحاليلِ الحمضيَّةِ الموجودةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C.

$$pOH = 14.0 - pH = 14.0 - 6.0 = 8.0$$

وتظهرُ حساباتٌ أخرى مشابهةٌ أن pH للمحلولِ القاعديِّ عند درجةِ حرارةِ 25°C أكبرُ من 7.0، وأن pOH أصغرُ من 7.0. هذه العلاقاتُ وعلاقاتٌ أخرى غيرُها مسجَّلةٌ في الجدولِ 4-4، تذكَّرْ أنه كلما تغيَّرتْ درجةُ الحرارةِ تتغيَّرُ القيمةُ الدقيقةُ لـ pH أو لـ pOH، وذلك لأن قيمةَ K_w معرَّضةٌ للتغيُّرِ. ومن ناحيةٍ ثانيةٍ تبقى العلاقةُ $pH + pOH = pK_w$ ثابتةً ولا تتغيَّرُ.

الجدول 4-4 $[H_3O^+]$، $[OH^-]$، pH، pOH للمحاليلِ

المحلول	الحالةُ العامَّةُ	عند درجةِ حرارةِ 25°C
المتعادلُ	$[H_3O^+] = [OH^-]$ $pH = pOH$	$[H_3O^+] = [OH^-] = 1 \times 10^{-7}$ M $pH = pOH = 7.0$
الحمضيُّ	$[H_3O^+] > [OH^-]$ $pH < pOH$	$[H_3O^+] > 1 \times 10^{-7}$ M $[OH^-] < 1 \times 10^{-7}$ M $pH < 7.0$ $pOH > 7.0$
القاعديُّ	$[H_3O^+] < [OH^-]$ $pH > pOH$	$[H_3O^+] < 1 \times 10^{-7}$ M $[OH^-] > 1 \times 10^{-7}$ M $pH > 7.0$ $pOH < 7.0$

الحساباتُ المرتبطةُ بالرقمِ الهيدروجينيِّ pH

إذا عرفْتَ قيمةَ $[H_3O^+]$ أو قيمةَ pH لمحلولٍ معيَّنٍ فالقيمةُ الأخرى يمكنُ حسابُها. يجبُ استعمالُ الأرقامِ المعنويَّةِ بحذرٍ عند إجراءِ حساباتِ pH، لأن pH يمثِّلُ قيمةً لوغاريتميَّةً. والرقمُ الذي يقعُ إلى يسارِ الرقمِ العشريِّ يحدِّدُ موقعَ الفاصلةِ العشريَّةِ فقط، وهو لا يؤخذُ بعينِ الاعتبارِ عند حسابِ الأرقامِ المعنويَّةِ. لذلك يجبُ أن يتساوى عددُ الأرقامِ المعنويَّةِ التي عن يمينِ الفاصلةِ العشريَّةِ مع الأرقامِ المعنويَّةِ في العددِ الذي تمَّ حسابُ قيمتِهِ اللوغاريتميَّةِ. فعلى سبيلِ المثالِ، قيمةُ $[H_3O^+]$ تساوي 1×10^{-7}، لها رقمٌ معنويٌّ واحدٌ. لذلك، فإن pH أو –log هذه القيمةِ يجبُ أن يحتويَ على منزلةٍ عَشريَّةٍ واحدةٍ. بناءً عليه يجبُ أن يحتويَ pH أو –log هذه القيمةِ على خانةٍ واحدةٍ إلى يمينِ الفاصلةِ العشريَّةِ. إذن $pH = 7.0$.

حسابُ pH من $[H_3O^+]$

تعلمْتَ حتى الآن أبسطَ المسائلِ المتضمِّنةَ pH. في هذه المسائلِ تكونُ قيمةُ $[H_3O^+]$ في المحلولِ مساويةً لأسِّ الرقمِ 10، مثل 1 M أو 0.01 M. فيكونُ pH لمثلِ هذا النوعِ من المحاليلِ،مساويًا لأُسِّ تركيزِ أيوناتِ الهيدرونيوم مع تغييرِ الإشارةِ. مثلاً، المحلولُ الذي فيه $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-5}$، يكون له pH مساويًا لـ 5.0.

مسألةٌ نموذجية 2-4

ما قيمةُ pH لمحلولِ 1.0×10^{-3} M NaOH؟

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: نوعيَّةُ المحلولِ وتركيزُه = 1.0×10^{-3} M NaOH

المجهول: pH للمحلولِ

2 خطِّطْ

تركيزُ القاعدةِ ← تركيز OH^- ← تركيز H_3O^+ ← pH

يتفكَّكُ NaOH، تمامًا عند إذابتِهِ في الماءِ. وبالتالي يكونُ $[OH^-]$ مساويًا لـ $[NaOH]$. وبما أن K_w يساوي 1.0×10^{-14} يمكنُ حسابُ تركيزِ H_3O^+ ومن ثَمَّ حسابُ pH.

3 احسبْ

$$[H_3O^+][OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$[H_3O^+] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[OH^-]} = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{1.0 \times 10^{-3}} = 1.0 \times 10^{-11}\ M$$

$$pH = -\log [H_3O^+] = -\log (1.0 \times 10^{-11}) = 11.00$$

4 قيِّمْ

يحدِّدُ الجوابُ بشكلٍ صحيحٍ أن NaOH يكوِّنُ محلولاً ذا $pH > 7$، لذا يكونُ المحلولُ قاعديًّا. يحتوي الجوابُ على عددِ أرقامٍ عن يمينِ الفاصلةِ مساوٍ لعددِ الأرقامِ المعنويَّةِ في العددِ الأصليِّ.

تمارينُ تطبيقية

1. احسبْ pH للمحاليل التالية:

أ. 1×10^{-3} M HCl
ج. 1×10^{-4} M NaOH
ب. 1.0×10^{-5} M HNO_3
د. 1.0×10^{-2} M KOH

الجواب

1. أ. pH = 3.0 ج. pH = 10.0
ب. pH = 5.00 د. pH = 12.00

استخدامُ الآلةِ الحاسبةِ لإيجادِ pH من $[H_3O^+]$

تتضمَّنُ مسائلُ عديدةٌ قيمًا لتراكيزِ أيونِ الهيدرونيوم لا تساوي أسسًا للرقمِ 10. يحتاجُ حلُّ مثلِ هذه المسائلِ إلى الآلةِ الحاسبةِ. ومعظمُ الآلاتِ الحاسبةِ مزوَّدةٌ بمفتاحِ "log". راجعِ التعليماتِ الخاصَّةَ باستخدامِ حاسبتِك.

يمكنُ تقديرُ pH واستخدامُه لتسجيلِ حساباتِك. لنفترضْ، على سبيلِ المثالِ، أن $[H_3O^+]$ في أحدِ المحاليلِ 3.4×10^{-5} M. فبما أن القيمةَ 3.4×10^{-5} تتراوحُ بين 10^{-4} و 10^{-5}، فإن pH للمحلولِ لا بدَّ أن يقعَ بين 4 و 5. وتوضحُ المسألةُ النموذجيَّةُ 3-4 عمليَّةَ حسابِ قيمةِ pH لمحلولٍ فيه $[H_3O^+] = 3.4 \times 10^{-5}$ M.

مسألةٌ نموذجية 3-4

ما مقدارُ pH للمحلولِ الذي يكونُ فيه $[H_3O^+]$ مساويًا لـ 3.4×10^{-5} M؟

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: $[H_3O^+] = 3.4 \times 10^{-5}$ M

المجهول: pH للمحلول

2 خطِّطْ

$$[H_3O^+] \rightarrow pH$$

الفرقُ الوحيدُ بين هذه المسألةِ وبين ما سبقَ من مسائلِ pH أنك ستقومُ بتحديدِ قيمةِ لوغاريتمِ 3.4×10^{-5} مستخدمًا الآلةَ الحاسبةَ. ويمكنُك تحويلُ الأرقامِ للوغاريتمِ باستخدامِ المفتاحِ "log".

3 احسبْ

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

$$= -\log (3.4 \times 10^{-5})$$

$$= 4.47$$

4 قيِّمْ

إن pH لمحلولِ 1×10^{-5} M H_3O^+ هو 5. وإن محلولاً ذا تركيزٍ أكبرَ من H_3O^+ سيكونُ أكثرَ حمضيَّةً، وسيكونُ له pH أقلُّ من 5. ولأن للتركيزِ رقمَين معنويَّين، سيكونُ لـ pH رقمانِ على يمينِ الفاصلةِ العشريَّةِ.

تمارينُ تطبيقية

1. ما pH للمحلولِ الذي يكونُ فيه $[H_3O^+]$ مساويًا لـ 6.7×10^{-4} M؟
2. ما pH للمحلولِ الذي يكونُ فيه $[H_3O^+]$ مساويًا لـ 2.5×10^{-2} M؟
3. احسبْ قيمةَ pH للمحلولِ 2.5×10^{-6} M HNO_3.
4. احسبْ قيمةَ pH للمحلولِ 2.0×10^{-2} M $Sr(OH)_2$.

الجواب

1. pH = 3.17
2. pH = 1.60
3. pH = 5.60
4. pH = 12.60

حسابُ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ من pH

تعلَّمْتَ مما سبقَ كيف تحسُبُ pH لمحلولٍ معروفِ الـ $[H_3O^+]$. لنفترضْ أنك أُعطيتَ pH لمحلولٍ، بدلاً من $[H_3O^+]$، فكيف يمكنُكَ تحديدُ تركيزِ أيونِ الهيدرونيومِ فيه؟
لقد أصبحَتِ المعادلةُ التاليةُ معروفةً لديك:

$$pH = -\log [H_3O^+]$$

تذكَّرْ أن أساسَ اللوغاريتمِ هو 10. بذلك يكونُ معكوسُ اللوغاريتمِ هو 10 مرفوعًا إلى ذلك العددِ.

$$\log [H_3O^+] = -pH$$
$$[H_3O^+] = \text{antilog } (-pH)$$
$$[H_3O^+] = 10^{-pH}$$

ولعلَّ أبسطَ الحالاتِ هي التي تكونُ فيها قيمةُ pH أعدادًا صحيحةً. إن الأُسَّ 10 الذي يعطي $[H_3O^+]$ هو سالبُ pH. فمثلاً، المحاليلُ المائيةُ التي لها $pH = 2$، يكونُ $[H_3O^+]$ فيها مساويًا لـ 10^{-2} M. وبالطريقة نفسِها، عندما يكونُ $pH = 0$، يكونُ $[H_3O^+] = 1$ M، وذلك لأن $10^0 = 1$. توضِحُ المسألةُ النموذجيَّةُ 4-4 كيف يتمُّ تحويلُ قيمةِ pH عندما تكونُ عددًا صحيحًا موجبًا. والمسألةُ النموذجيَّةُ 4-5 تبيِّنُ كيفيةَ تحويل pH عندما لا يكونُ pH عددًا صحيحًا.

مسألةٌ نموذجية 4-4

احسبْ تركيزَ أيونِ الهيدرونيوم لمحلولٍ مائيٍّ له pH يساوي 4.0؟

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: $pH = 4.0$

المجهول: $[H_3O^+]$

2 خطِّطْ

$$pH \rightarrow [H_3O^+]$$

تحتاجُ هذه المسألةُ إلى إعادةِ تنظيمٍ لمعادلةِ pH، وذلك لإيجادِ $[H_3O^+]$. وبما أن 4.0 لها خانةٌ واحدةٌ عن يمينِ الفاصلةِ العشريَّةِ، فالجوابُ يجبُ أن يحتويَ على رقمٍ معنويٍّ واحدٍ.

$$pH = -\log [H_3O^+]$$
$$\log [H_3O^+] = -pH$$
$$[H_3O^+] = \text{antilog } (-pH)$$
$$[H_3O^+] = 1 \times 10^{-pH}$$

3 احسبْ

$$[H_3O^+] = 1 \times 10^{-pH}$$
$$[H_3O^+] = 1 \times 10^{-4} \text{ M}$$

4 قيِّمْ

المحلولُ ذو $pH = 4$ حمضيٌّ. الجواب، 1×10^{-4} M، أكبرُ من 1.0×10^{-7} M، وهذا صحيحٌ بالنسبةِ إلى محلولٍ حمضيٍّ.

مسألةٌ نموذجية 4-5

قِيسَ الرقمُ الهيدروجينيُّ pH لمحلولٍ معيَّن فكانَ قياسُهُ 7.52.

أ. ما تركيزُ أيونِ الهيدرونيوم؟ ب. ما تركيزُ أيونِ الهيدروكسيد؟ ج. هل المحلولُ حمضيٌّ، أم قاعديٌّ؟

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: pH للمحلول = 7.52

المجهول: أ. $[H_3O^+]$

ب. $[OH^-]$

ج. حمضيَّةُ المحلولِ أو قاعديَّته

2 خطِّطْ

$$pH \rightarrow [H_3O^+] \rightarrow [OH^-]$$

هذه المسألةُ، مثلُ مسائلِ pH السابقة، تحتاجُ إلى تعويضِ القيمِ في المعادلةِ $pH = -\log [H_3O^+]$، وإلى استخدامِ الآلةِ الحاسبةِ. فورَ تحديدِ $[H_3O^+]$، يمكنُ استخدامُ ثابتِ الحاصلِ الأيونيِّ $[H_3O^+][OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$ لحسابِ قيمةِ $[OH^-]$.

3 احسبْ

أ. $pH = -\log [H_3O^+]$

$\log [H_3O^+] = -pH$

$[H_3O^+] = \text{antilog}\ (-pH) = \text{antilog}\ (-7.52) = 1.0 \times 10^{-7.52} = 3.0 \times 10^{-8}\ M\ H_3O^+$

ب. $[OH^-][H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-14}$

$$[OH^-] = \frac{1.0 \times 10^{-14}}{[H_3O^+]}$$

$$= \frac{1.0 \times 10^{-14}}{3.0 \times 10^{-8}} = 3.3 \times 10^{-7}\ M\ OH^-$$

ج. قيمةُ $pH = 7.52$، إنها تزيدُ قليلاً عن قيمةِ $pH = 7$. هذا يعني أن المحلولَ قليلُ القاعديَّةِ.

4 قيِّمْ

بما أن المحلولَ قليلُ القاعديَّةِ، يُتوقَّعُ أن يكونَ تركيزُ أيونِ الهيدروكسيدِ فيه أكبرَ بقليلٍ من 10^{-7} M وتركيزُ أيونِ الهيدرونيوم أقلَّ بقليلٍ من 10^{-7} M. عموماً، يتَّفقُ الجوابُ مع هذه التوقُّعاتِ.

تمارينُ تطبيقية

1. ما تركيزُ أيونِ الهيدرونيوم لمحلولٍ رقمُهُ الهيدروجينيُّ $pH = 5.0$؟
2. ما تركيزُ أيونِ الهيدرونيوم لمحلولٍ رقمُهُ الهيدروجينيُّ $pH = 12.0$؟
3. احسبْ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ لمحلولٍ مائيٍّ رقمُهُ الهيدروجينيُّ $pH = 1.50$.
4. احسبْ $[H_3O^+]$ لمحلولٍ مائيٍّ رقمُهُ الهيدروجينيُّ $pH = 3.67$.

الجواب

1. $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-5}$ M
2. $[H_3O^+] = 1 \times 10^{-12}$ M
3. $[H_3O^+] = 3.2 \times 10^{-2}$ M، $[OH^-] = 3.2 \times 10^{-13}$ M
4. $[H_3O^+] = 2.1 \times 10^{-4}$ M

الجدول 4-5 العلاقةُ بين $[H_3O^+]$، و $[OH^-]$ و pH عند درجةِ حرارةِ 25°C

المحلول	$[H_3O^+]$	$[OH^-]$	pH
1.0×10^{-2} M KOH	1.0×10^{-12}	1.0×10^{-2}	12.00
1.0×10^{-2} M NH_3	2.4×10^{-11}	4.2×10^{-4}	10.63
H_2O نقي	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}	7.00
1.0×10^{-3} M HCl	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-11}	3.00
1.0×10^{-1} M CH_3COOH	1.3×10^{-3}	7.5×10^{-12}	2.87

حساباتُ pH وقوةِ الأحماضِ والقواعدِ

ناقشْنا إلى الآن pH لمحاليلَ تحتوي على حمضٍ قويٍّ أو قاعدةٍ قويَّةٍ فقط. علينا أيضًا الأخذُ بعينِ الاعتبارِ الأحماضَ والقواعدَ الضعيفةَ. يعرضُ الجدولُ 4-5 قيمَ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ و pH لمحاليلَ متعدِّدةٍ.

تشيرُ مولاريَّةُ محلولِ KOH مباشرةً إلى $[OH^-]$، ومنها يمكنُ حسابُ $[H_3O^+]$. وعند معرفةِ $[H_3O^+]$ يمكنُ حسابُ pH، كما في المسألةِ النموذجيَّةِ 4-3. وإذا قيسَ pH لهذا المحلولِ عمليًّا، فقيمتُهُ ستكونُ مساويةً للقيمةِ المحسوبةِ. وستُعرَضُ الطرقُ العمليَّةُ المستخدمةُ في قياسِ pH للمحاليلِ في القسمِ 2 من هذا الفصلِ. إن حمضَ الهيدروكلوريكِ، HCl، حمضٌ قويٌّ، ويمكنُ إجراءُ حساباتٍ مشابهةٍ للمحاليلِ المحتويةِ على HCl.

أما محاليلُ الأحماضِ الضعيفةِ كحمضِ الأسيتيكِ، CH_3COOH، فمسألةٌ مختلفةٌ. إن قيمةَ $[H_3O^+]$ لا يمكنُ أن تُحسبَ مباشرةً من التركيزِ المولاريِّ، وذلك لعدمِ تأيُّنِ جميعِ جزيئاتِ حمضِ الأسيتيكِ. والمشكلةُ ذاتُها تواجهُنا في حالةِ القواعدِ الضعيفةِ، مثل الأمونيا، NH_3، حيث يجبُ إيجادُ pH لهذه المحاليلِ بالقياسِ العمليِّ. وبعدئذٍ يمكنُ أن تُحسَبَ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ من قيمِ pH المقيسةِ.

مراجعةُ القسمِ 1-4

1. ما تركيزُ أيونَي الهيدرونيوم والهيدروكسيدِ في الماءِ النقيِّ عند درجةِ حرارةِ 25°C؟

2. لماذا يتدرجُ سلَّمُ pH، بصورةٍ عامَّةٍ، من 0 إلى 14 في المحاليلِ المائيَّةِ؟

3. لماذا يمثِّلُ pH = 7 محلولاً متعادلاً عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ 25°C؟

4. في محلولٍ يحتوي على 4.5×10^{-3} M HCl، احسبْ ما يلي:

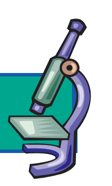
أ. $[H_3O^+]$ ب. $[OH^-]$ ج. pH

5. المحلولُ $Ca(OH)_2$ له pH = 8.0. احسبْ ما يلي:

أ. $[H_3O^+]$ ب. $[OH^-]$ ج. $[Ca(OH)_2]$

تفكيرٌ ناقد

6. توقُّعُ نتائج: رتِّبِ المحاليلَ التاليةَ تبعًا لقيمِ pH، من أصغرِها إلى أكبرِها 0.10 M HCl، 0.10 M H_2SO_4، 0.10 M HF.



قراءةٌ علميَّةٌ

معالجةُ الجداولِ الحمضيَّةِ بالكلسِ

في عام 1987 اختبرَ عالِمُ الأحياءِ كين سيمونز معيشةَ أسماكٍ من السلمونِ القزحيِّ في مياهِ جداولَ تقعُ شمالَ شرقِ الولاياتِ المتَّحدةِ. قامَ سيمونز بوضعِ أسماكِ السلمونِ في أقفاصٍ داخلَ الجدولِ ليراقبَ سلوكَها وقدرتَها على العيشِ، فلاحظَ أن السمكَ يموتُ بعد ثلاثةِ أيامٍ، لأن الأمطارَ الحمضيةَ قلَّلتْ مستوى pH الماءِ إلى درجةٍ لا يستطيعُ السلمونُ تحمُّلَها.

سببُ الأمطارِ الحمضيَّةِ هو احتراقُ الوقودِ الأحفوريِّ الذي نستخدمُهُ لتسييرِ مركباتِنا ومصانعِنا. فمن احتراقِ هذا الوقودِ تنبعثُ موادُّ تحتوي على الكبريتِ والنيتروجينِ، وتتَّحدُ مع بخارِ الماءِ في الهواءِ فتحولُهُ إلى بخارٍ حمضيٍّ. يبلغُ مستوى pH ماءِ المطرِ العاديِّ حواليْ 5.5، كما أمكنَ تسجيلُ مستوياتٍ وصلَتْ إلى 4.3.

يخفضُ المطرُ الحمضيُّ مستوى pH الجداولِ والأنهارِ، مما يؤثِّرُ بشكلٍ كبيرٍ في حياةِ معظمِ الأحياءِ الموجودةِ فيها. بل إن بعضَ الأسماكِ، لاسيما السلمونَ القزحيَّ، تموتُ، بينَما تفقدُ أنواعٌ أخرى منه، كالسلمونِ البنيِّ، قدرتَها على الإباضةِ في هذه المياهِ.

وفي سنةِ 1987 لم تتمكَّنْ أبدًا أسماكُ السلمونِ البنّيِّ من الإباضةِ في أحدِ جداولِ شمالِ الولاياتِ المتَّحدةِ، إذ وصلَ مستوى pH تلك السنةِ إلى 5.97، فانخفضَ تعدادُ أسماكِ السلمونِ عمومًا بشكلٍ كبيرٍ. وفي عامِ 1989 أجرى الدكتور سيمونز وباحثانِ آخرانِ تجربةً لتقليلِ حمضيَّةِ هذا الجدولِ، فابتكروا في جزءٍ منه، نظامًا يضيفُ كربوناتِ الكالسيومِ، أو حجرَ الكلسِ، بكمّيّاتٍ مقيسةٍ بشكلٍ دائمٍ.

يتفاعلُ الكلسُ المسحوقُ مع الحمضِ تلقائيًّا، فيزيدُ ذلك من مستوى pH الماءِ. استغرقَتِ التجربةُ ثلاثَ سنين، ونجحتْ في رفعِ متوسطِ pH الجدولِ من 5.97 إلى 6.54، وهو ما سعى إليه العلماءُ. وفي الوقتِ نفسِهِ انخفضَ، في المناطقِ الكلسيَّةِ، تركيزُ أيوناتِ الألمنيومِ، وهي سامَّةٌ بالنسبةِ للسلمونِ، في وقتٍ ارتفعَ فيه هذا التركيزُ في المناطقِ غيرِ المعالجةِ من الجدولِ.

وقد تمَّ بنجاحٍ عرضُ المشروعِ بشكلٍ عمليٍّ ومقنعٍ للقاطنين بجوارِ الجدولِ بصورةٍ رئيسةٍ، فقد ازدادَتْ حصيلةُ أسماكِ السلمونِ في الجدولِ، وانخفضَ معدلُ وفياتِ السلمونِ البنيِّ فيه إلى درجةٍ كبيرةٍ. ولأولِ مرةٍ منذ سنواتٍ، باتتِ الأسماكُ تتجهُ إلى الجداولِ من مصادرِها في النهرِ. ولدى اختبارِهِ للسلمونِ القزحيِّ مرةً أخرى في مياهِ الجدولِ عام 1991 وجدَ الدكتور سيمونز أن السمكَ بأجمعِهِ بقيَ حيًّا.

يقولُ الدكتور سيمونز: نحنُ لا ننظرُ بجلاءٍ إلى الموضوعِ وكأنه الحلُّ، إنما هو مجردُ علاجٍ أوليٍّ، ونحتاجُ إلى بياناتٍ أكثرَ للوصولِ إلى قرارٍ إداريٍّ حكيمٍ حولَ ضررٍ أو فائدةِ العلاجِ بالكلسِ. وفي رأيي، يقولُ سيمونز، هذا هو مفتاحُ الدراسةِ، فقد زوَّدَتْنا مبدئيًّا بمعلوماتٍ نبتدئُ منها.

قامَ علماءُ الأحياءِ بدراسةِ سمكةِ السلمونِ لتحديدِ فاعليَّةِ المعالجةِ بالكلسِ لرفعِ pH الجدولِ.

أسئلة

1. صفْ فائدتَينِ محتملتَينِ تتحقَّقانِ بإضافةِ كمّيّاتٍ مقيسةٍ من القاعدةِ $CaCO_3$ إلى الجدولِ الحمضيِّ.
2. ما العناصرُ المسؤولةُ عن تكوُّنِ المطرِ الحمضيِّ؟ وكيف تصلُ هذه العناصرُ إلى ماءِ المطرِ؟

القسم 2-4

تحديدُ الرقمِ الهيدروجينيِّ والمعايراتُ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يصفُ آليَّةَ عملِ كاشفِ الحمضِ-القاعدةِ.
- يوضحُ آليَّةَ تنفيذِ معايرةِ حمضٍ-قاعدةٍ.
- يحسبُ مولاريَّةَ المحلولِ مستخدمًا بياناتِ المعايرةِ.

الكواشفُ ومقياسُ pH

يمكنُ الحصولُ على قيمةِ pH تقريبيةٍ لمحلولٍ معيّن، باستخدامِ كواشفِ الحمضِ-القاعدةِ. **وكواشفُ الحمضِ-القاعدةِ acid-base indicators** ***مركَّباتٌ تتغيَّرُ ألوانُها بتغيُّرِ pH المحلولِ.***

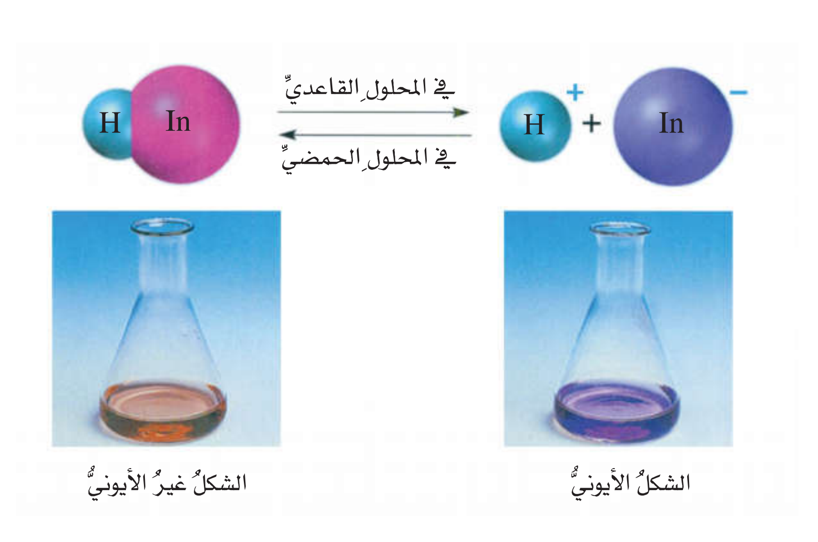
تغيِّرُ الكواشفُ ألوانَها لكونِها إما أحماضًا ضعيفةً وإما قواعدَ ضعيفةً. وإن اتِّزانَ كاشفٍ (حمضٍ ضعيفٍ) في محلولٍ يمكنُ تمثيلُهُ بالمعادلةِ التاليةِ، الموضَّحةِ أيضًا في الشكل 4-4.

$$HIn \rightleftarrows H^+ + In^-$$

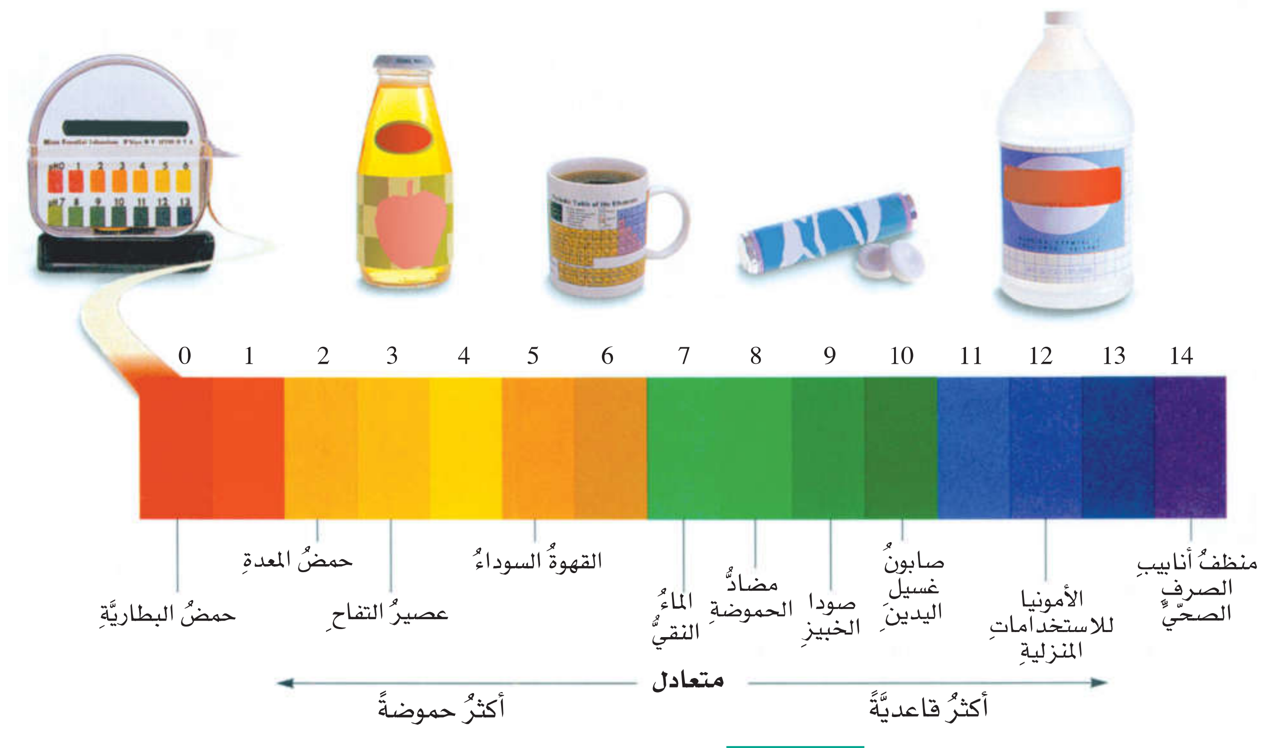
(يمثِّلُ In^- رمزَ الجزءِ الأنيونيِّ من الكاشفِ). والألوانُ التي يُظهرُها الكاشفُ تَنتجُ من أن لكلٍّ من HIn و In^- لونًا مختلفًا عن لونِ الآخرِ.

في المحاليلِ الحمضيَّةِ، تعملُ أيوناتُ In^- كقواعدِ برونشتيد، فتستقبلُ بروتوناتٍ من الحمضِ. وعندئذٍ يبقى الكاشفُ بنسبةٍ عاليةٍ غيرَ متأيِّنٍ، HIn. ويكونُ للكاشفِ لونُ حمضِهِ HIn المميّزِ، وهو اللونُ الأحمرُ لكاشفِ تبّاعِ الشمسِ، كما يظهرُ في الشكل 4-4.

في المحاليلِ القاعديَّةِ، تتَّحدُ أيوناتُ OH^- (مصدرُها القاعدةُ) مع أيوناتِ H^+ التي ينتجُها الكاشفُ. فيزدادُ تأيُّنُ جزيئاتِ الكاشفِ للتعويضِ عن فَقدِ أيوناتِ H^+. ولهذا يزدادُ تركيزُ الأيونِ In^- في المحلولِ، ويكتسبُ المحلولُ بالتالي لونَ هذا الأيونِ، وهو اللونُ الأزرقُ بالنسبةِ لكاشفِ تبّاعِ الشمسِ.



الشكل 4-4 تغيِّرُ المحاليلُ القاعديةُ اتجاهَ معادلةِ اتزانِ الكاشفِ تبّاعِ الشمسِ نحوَ اليمينِ. وعندها يغلبُ الشكلُ الأيونيُّ، In^-، فيتحولُ لونُ تبّاعِ الشمسِ إلى الأزرقِ. من ناحيةٍ ثانيةٍ، تغيِّرُ المحاليلُ الحمضيةُ اتجاهَ معادلةِ اتزانِ الكاشفِ تبّاعِ الشمسِ إلى اليسارِ. وعندها يغلبُ الشكلُ غيرُ الأيونيِّ HIn ويتحوَّلُ لونُ تبّاعِ الشمسِ إلى الأحمرِ.



الشكل 4-5 يمكنُ تحديدُ pH لمحلولٍ من خلالِ مقارنةِ اللونِ الذي تتحوَّلُ إليه ورقةُ pH بسلّمِ ورقةِ المقارنةِ. يُظهرُ الشكلُ ألوانَ ورقةِ pH عند قيمٍ مختلفةٍ لـ pH، بالإضافةِ إلى قيمِ pH لبعضِ الموادِّ الشائعةِ الاستخدامِ في الحياةِ اليوميَّةِ.

للكواشفِ ألوانٌ متعدِّدةٌ. ويختلفُ المدى الدقيقُ لـ pH الذي يغيِّرُ ضمنَهُ الكاشفُ لونَه. ***يسمّى مدى pH الذي يغيِّرُ ضمنَهُ الكاشفُ لونَهُ المدى الانتقاليَّ*** **transition interval**. يبيِّنُ الجدولُ 4-6 تغيُّراتِ اللونِ والمدى الانتقاليِّ لعددٍ من كواشفِ الحمضِ-القاعدةِ الشائعةِ.

الكواشفُ التي تغيِّرُ ألوانَها عند pH أقلَّ من 7، كبرتقاليِّ الميثيل، تُعدُّ أحماضًا أقوى من بقيةِ أنواعِ الكواشفِ. وهي تميلُ إلى التأيُّنِ أكثرَ من سواها. إن ما تنتجهُ هذه الكواشفُ من أنيوناتِ In^- هي قواعدُ أضعفُ بحسبِ برونشتيد، وميلُها إلى استقبالِ بروتوناتٍ أقلُّ من أيِّ حمضٍ تمَّ اختبارُه. لهذا السببِ لا تتحوَّلُ هذه الكواشفُ إلى شكلِها غيرِ الأيونيِّ (HIn) ما لم يكنْ تركيزُ H^+ عاليًا بما فيه الكفايةُ. إن الانتقالَ اللونيَّ لهذه الكواشفِ يحدثُ عند قيمٍ متدنّيةٍ لـ pH، وفي المقابلِ، تكونُ الكواشفُ التي يتغيَّرُ لونُها في مدًى أعلى لـ pH، كالفينولفثالينِ مثلاً، أحماضًا أضعفَ.

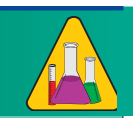
تصنعُ الكواشفُ العامَّةُ universal indicators بمزجِ كواشفَ مختلفةٍ ومتعدِّدةٍ. وتسمّى ورقةُ الاختبارِ المغمَّسةُ في محلولِ كاشفٍ عامٍّ، ورقةَ pH (pH paper). لهذه الورقةِ القدرةُ على اكتسابِ أيِّ لونٍ من ألوانِ الطيفِ المرئيِّ، وهي تزوِّدُنا بطريقةٍ دقيقةٍ إلى حدٍّ مقبولٍ للتمييزِ بين pH للمحاليلِ المختلفةِ، كما يظهرُ في الشكلِ 4-5.

وإذا تطلَّبَ الأمرُ الحصولَ على قيمةٍ أكثرَ دقَّةً لـ pH محلولٍ، يمكنُ استخدامُ مقياسِ pH (pH meter)، الظاهرِ في الشكلِ 4-6. ***يحدِّدُ مقياسُ pH،*** **(pH meter)**، ***قيمةَ pH لمحلولٍ من خلالِ قياسِ فرقِ الجهدِ بين إلكترودينِ موضوعَينِ في المحلولِ.*** ويتغيَّرُ فرقُ الجهدِ مع تغيُّرِ تركيزِ أيونِ الهيدرونيومِ في المحلولِ.

الشكل 4-6 يقيسُ مقياسُ pH قيمةَ pH لمحلولٍ بدقَّةٍ كبيرةٍ.

الجدول 6-4 مدى تغيُّرِ ألوانِ كواشفَ متعدِّدةٍ مستخدمةٍ في عمليّاتِ المعايرةِ

نوعُ المعايرةِ	الكاشف	لونُ الحمضِ	لونُ المدى الانتقاليِّ	لونُ القاعدةِ
حمضٌ قويٌّ/قاعدةٌ قويَّةٌ	أحمرُ الميثيلِ (6.2-4.4)			
		11 10 9 8 7 6 5 4 3		
	أزرقُ البروموثيمولِ (7.6-6.2)			
حمضٌ قويٌّ/قاعدةٌ ضعيفةٌ	برتقاليُّ الميثيلِ (4.4-3.1)			
		8 7 6 5 4 3 2 1 0		
	أزرقُ البروموفينولِ (4.6-3.0)			
حمضٌ ضعيفٌ/قاعدةٌ قويَّةٌ	الفينولفثالين (10.0-8.0)			
		12 11 10 9 8 7 6 5 4		
	أحمرُ الفينولِ (8.0-6.4)			



نشاط عملي سريع

اختبارُ pH لماءِ المطرِ

ضع النظارةَ الواقيةَ والمريولَ

المواد

- ماءُ مطر
- ماءٌ مقطَّرٌ
- أوعيةٌ سعةُ 500 mL
- مسطرةٌ متريَّةٌ شفّافةٌ رفيعةٌ (± 0.1 cm)
- أوراقُ اختبارِ pH ذاتُ مدًى قصير (± 0.2-0.3)، أو مقياسُ pH

السؤال

هل توجدُ ترسُّباتٌ حمضيَّةٌ في منطقةِ سكنِك؟

الطريقة

سجِّلْ كلّ نتائجِك في جدولِ بياناتٍ.

1. حضِّرْ خمسةَ أوعيةٍ متماثلةٍ، ووزعْها في مناطقَ مختلفةٍ قبيلَ انهمارِ المطر كي تجمِّعَ عيّناتٍ منه. إذا استمرَّ هطولُ المطرِ لأكثرَ من 24 ساعةً، ضعْ أوعيةً جديدةً لجمعِ عيّناتٍ إضافيَّةٍ بعد كلِّ فترةِ 24 ساعةً حتى يتوقَّفَ هطولُ المطرِ.
2. استعملْ مسطرةً بلاستيكيَّةً رقيقةً لقياسِ عمقِ الماءِ داخلَ كلِّ وعاءٍ، مقرَّبًا إلى 0.1 cm. استخدمْ أوراقَ pH لقراءةِ وتحديدِ pH لماءِ المطرِ مقرَّبًا إلى 0.2-0.3 جزءٍ من الدرجةِ.
3. سجِّلِ المعلوماتِ التاليةَ:
   أ. تواريخَ تجميعِ العيِّناتِ وأوقاتَه.
   ب. تاريخَ نهايةِ التجميعِ ووقتَه.
   ج. مكانَ جمعِ العيِّناتِ (المنطقةَ والمدينةَ).
   د. كمّيَّةَ المطرِ المجمَّعِ بالسنتيمتراتِ.
   هـ. pH لماءِ المطرِ.
4. جدْ متوسِّطَ pH لكلِّ مجموعةٍ من العيِّناتِ، وسجِّلِ النتائجَ في جدولِ البياناتِ.
5. جمّعْ عيّناتٍ مأخوذةً في أيامٍ مختلفةٍ (5 أيامٍ على الأقلِّ). فكلما زادَ عددُ العيّناتِ التي تجمعُها ازدادتِ القيمةُ المعرفيَّةُ لبياناتِك.
6. حدِّدْ، لأجلِ المقارنةِ، pH للماءِ النقيِّ بفحصِ 5 عيّناتٍ من الماءِ المقطّرِ، مستخدمًا أوراقَ pH. سجِّلْ نتائجَكَ في جدولِ بياناتٍ منفصلٍ، ثم احسبْ متوسِّطَ pH للماءِ المقطّرِ.

المناقشة

1. ما قيمةُ pH للماءِ المقطَّرِ؟
2. ما قيمةُ pH لماءِ المطرِ العاديِّ؟ كيف تفسِّرُ كلَّ اختلافٍ يلاحظُ في قراءاتِ pH؟
3. ما مساوئُ استخدامِ المسطرةِ البلاستيكيَّةِ في قياسِ عمقِ الماءِ المجمَّعِ؟ كيف يمكنُكَ زيادةَ الدقَّةِ في القياسِ؟
4. هل تؤثِّرُ كمّيَّةُ ماءِ المطرِ أو وقتُ تجميعِ العيّنةِ في قيمةِ pH؟ حاولْ تفسيرَ أيِّ اختلافٍ تلاحظُهُ بين العيّناتِ.
5. ما الاستنتاجُ الذي تستخلصُهُ من هذه التجربةِ؟ فسِّرِ استنتاجَكَ في ضوءِ ما حصلْتَ عليه من بياناتٍ.

المعايرة

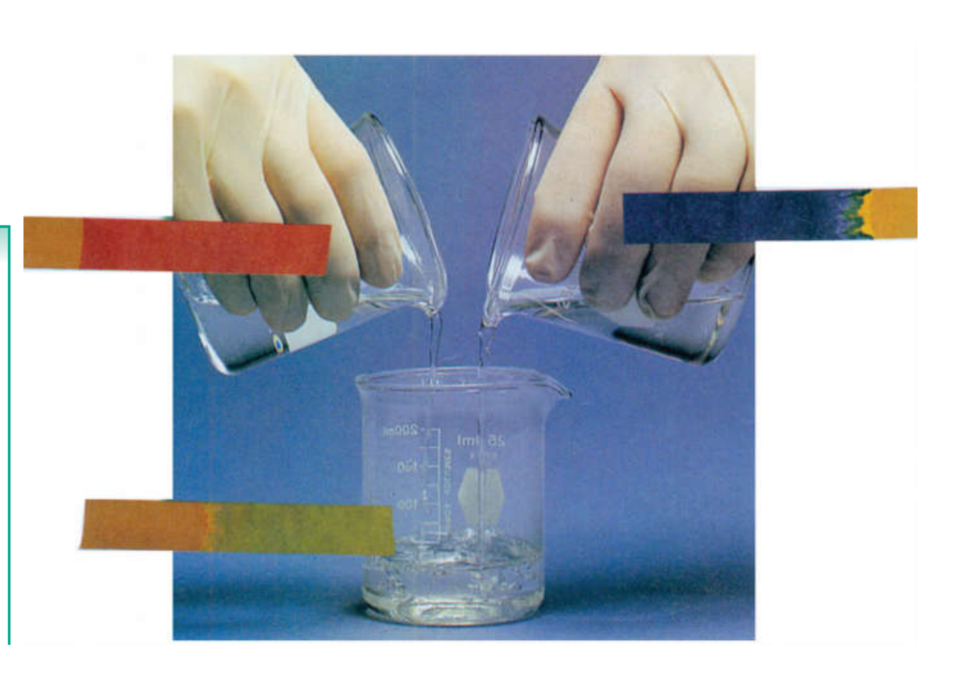
أصبحَ معلومًا ممّا تقدَّمَ أن تفاعلاتِ التعادلِ تحصلُ بين الأحماضِ والقواعدِ. فأيونُ OH^- يكتسبُ بروتونًا من أيونِ H_3O^+ لتكوينِ جزيئَينِ من الماءِ. وتلخِّصُ المعادلةُ التاليةُ هذا التفاعل.

$$H_3O^+(aq) + OH^-(aq) \rightleftarrows 2H_2O(l)$$

تُبيِّنُ هذه المعادلةُ أن 1 mol من أيوناتِ الهيدرونيوم و 1 mol من أيوناتِ الهيدروكسيدِ كمّيَّتانِ متكافئتانِ كيميائيًّا، وأنهما تتَّحدانِ بنسبةِ 1 mol:1 mol. يحصلُ التعادلُ عندما تعطي المتفاعلاتُ أعدادًا متساويةً من أيوناتِ الهيدرونيومِ وأيوناتِ الهيدروكسيدِ، كما يظهرُ في الشكل 4-7.

يحتوي اللترُ الواحدُ من محلولِ HCl 0.10 M على 0.10 mol من أيوناتِ الهيدرونيوم. لنفترض الآنَ أنه أُضيفَ 0.10 mol من NaOH الصلبِ إلى 1 L من محلولِ HCl 0.10 M. إن NaOH يذوبُ ويزوِّدُ المحلولَ بـ 0.10 mol من أيوناتِ الهيدروكسيدِ. إن HCl و NaOH موجودانِ بكمّيّاتٍ متكافئةٍ. تتَّحدُ أيوناتُ الهيدرونيومِ وأيوناتُ الهيدروكسيدِ الموجودةِ بالكمّيَّةِ نفسِها حتى يعودَ الناتجُ $[H_3O^+][OH^-]$ إلى القيمةِ 1×10^{-14}. وملحُ NaCl الناتجُ من هذا التفاعلِ هو نتيجةُ عمليَّةِ التعادلِ هذه بين حمضٍ قويٍّ وقاعدةٍ قويَّةٍ. ويكونُ المحلولُ الناتجُ متعادلاً.

وبما أن الأحماضَ والقواعدَ تتفاعلُ فيما بينها، فالإضافةُ المتزايدةُ لحمضٍ إلى قاعدةٍ (أو قاعدةٍ إلى حمضٍ) يمكنُ استخدامُها للمقارنةِ بين تركيزِ كلٍّ من الحمضِ والقاعدةِ. و**المعايرةُ titration** ***هي عمليَّةُ الإضافةِ المتحكَّمِ فيها لكميّاتٍ يتمُّ قياسُها من محلولٍ معلومِ التركيزِ ولازمةٍ لإتمامِ التفاعلِ مع كميَّةٍ معيَّنةٍ من محلولٍ مجهولِ التركيزِ.*** تزوِّدُنا عمليَّةُ المعايرةِ بطرقٍ حسّاسةٍ لتحديدِ الحجومِ المتكافئةِ كيميائيًّا لمحاليلَ حمضيَّةٍ أو قاعديَّةٍ.



الشكل 4-7 يحوِّلُ المحلولُ الموجودُ في الجهةِ اليسرى ورقةَ pH إلى اللونِ الأحمرِ لأنه حمضيٌّ. ويحوِّلُ المحلولُ الموجودُ في الجهةِ اليمنى ورقةَ pH إلى اللونِ الأزرقِ لأنه قاعديٌّ. عند تفاعلِ أعدادٍ متساويةٍ من أيوناتِ H_3O^+ و OH^- مصدرُها محاليلُ حمضيَّةٌ وقاعديَّةٌ، يكونُ المحلولُ الناتجُ متعادلاً. ويحوِّلُ المحلولُ المتعادلُ لونَ ورقةِ pH إلى اللونِ الأخضرِ.

نقطةُ التكافؤ

تسمَّى النقطةُ التي يكونُ فيها المحلولانِ المستخدمانِ في عمليَّةِ المعايرةِ بكمّيَّاتٍ متكافئةٍ كيميائيًّا* نقطةَ التكافؤِ equivalence point**. وتستخدمُ الكواشفُ وأجهزةُ قياسِ pH لتحديدِ هذه النقطةِ. عند هذه النقطةِ يُظهرُ مقياسُ pH تغيُّرًا كبيرًا في فرقِ الجهدِ. أما الكاشفُ، عند استخدامِهِ، فيتغيَّرُ لونُهُ عبر مدًى يتضمَّنُ نقطةَ التكافؤِ، كما يظهرُ في الشكلِ 4-8. ***وتسمَّى النقطةُ التي يتغيَّرُ عندها لونُ الكاشفِ خلالَ عمليَّةِ المعايرةِ* نقطةَ النهايةِ end point *لذلكَ الكاشفِ. نقطةُ التكافؤِ لا يمكنُ تعيينُها عمليًّا، لكن يمكنُ تقديرُ موضعِها بملاحظةِ تغيُّرِ اللونِ. وهذا التغيُّرُ يسمّى نقطةَ النهايةِ.

تُغيِّرُ بعضُ الكواشفِ، ومنها تبّاعُ الشمسِ، ألوانَها عند $pH = 7$، ويمتدُّ مدى تغيُّرِ اللونِ، بالنسبةِ لتبّاعِ الشمسِ، من $pH = 5.5$ إلى $pH = 8.0$. ويسبِّبُ هذا المدى الواسعُ صعوبةً في تحديدِ قيمةِ pH بالدقَّةِ المطلوبةِ. ويعتبرُ الكاشفُ، أزرقُ البروموثيمول، أفضلَ من هذه الناحيةِ، لأن لونَهُ يتغيَّرُ عبر مدى انتقالٍ محدودٍ: $pH = 6.2\text{-}7.6$ (راجع الجدولَ 4-6). وتُستخدَمُ الكواشفُ التي تُغيِّرُ ألوانَها حول $pH = 7$ في تحديدِ نقطةِ التكافؤِ لدى معايرةِ الأحماضِ القويَّةِ/القواعدِ القويَّةِ، وذلك لأنه عند تعادلِ الأحماضِ القويَّةِ مع القواعدِ القويَّةِ ينتجُ محلولٌ ملحيٌّ له pH تساوي 7.

من ناحيةٍ أخرى تعتبرُ الكواشفُ التي تُغيِّرُ ألوانَها، عند pH أقلَّ من 7، مفيدةً في تحديدِ نقطةِ التكافؤِ عند معايرةِ الأحماضِ القويَّةِ/القواعدِ الضعيفةِ. وبرتقاليُّ الميثيل هو مثالٌ على هذا النوعِ من الكواشفِ. وإن نقطةَ التكافؤِ، لدى معايرةِ حمضٍ قويٍّ/قاعدةٍ ضعيفةٍ، تكونُ حمضيَّةً. وذلك لأن الملحَ الناتجَ له تأثيرٌ حمضيٌّ، فيكونُ pH للمحلولِ الملحيِّ الناتجِ أقلَّ من 7.

أما الكواشفُ التي تغيِّرُ ألوانَها عند pH أعلى من 7 فهي مفيدةٌ في تحديدِ نقطةِ التكافؤِ لمعايرةِ الأحماضِ الضعيفةِ/القواعدِ القويَّةِ، والفينولفثالين هو مثالٌ على هذا النوعِ من الكواشفِ. وهذه التفاعلاتُ تنتجُ محاليلَ ملحيَّةً ذاتَ pH أعلى من 7. والسببُ في ذلك أن الملحَ الناتجَ له تأثيرٌ قاعديٌّ.

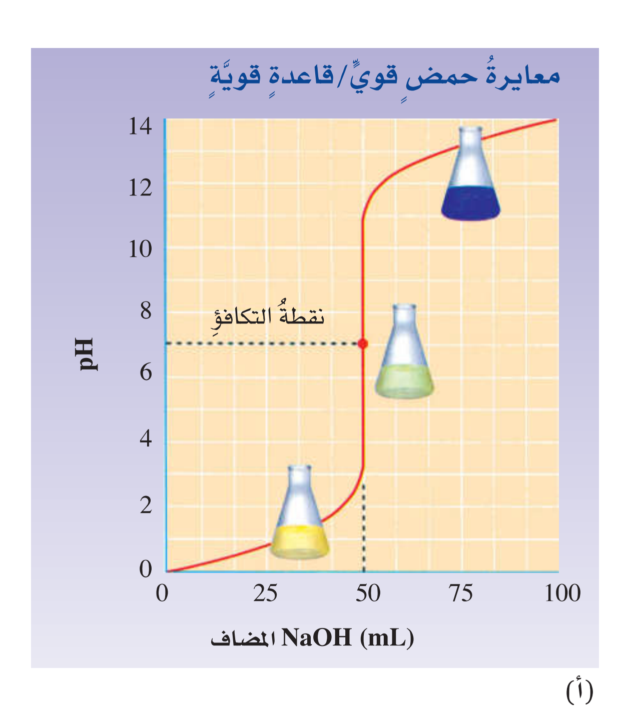
الكيمياءُ تطبيقيًّا

كيميائيٌّ تحليليٌّ

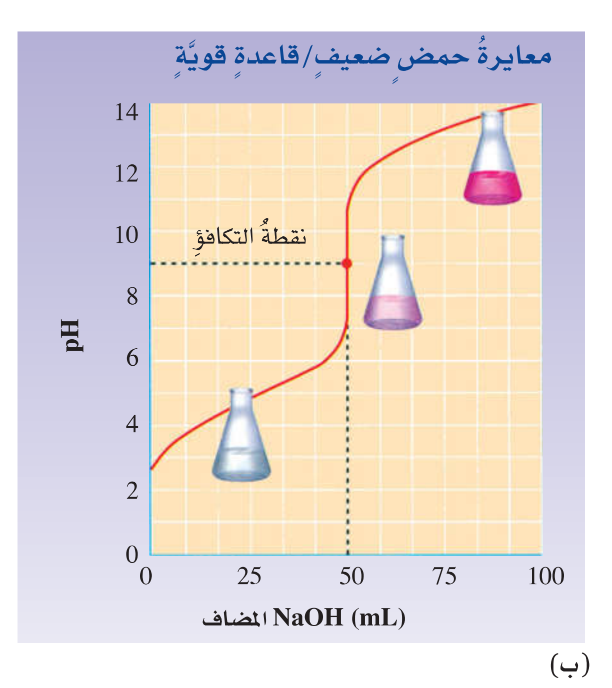
الوظيفةُ الأساسيَّةُ للكيميائيِّ التحليليِّ هي الحصولُ على معلوماتٍ من خلالِ قياساتٍ دقيقةٍ، يتمُّ معظمُها بواسطةِ أجهزةِ تحليلٍ متطوِّرةٍ تقيسُ كميّاتِ الموادِّ وهي في غايةِ الصغرِ. وبالإضافةِ إلى جمعِ البياناتِ، يقومُ الكيميائيُّ التحليليُّ بمعالجةِ هذه البياناتِ وتحليلِها ومقارنتِها بغيرِها من النتائجِ. وما يصلُ إليه الكيميائيُّ التحليليُّ من استنتاجاتٍ هو حصيلةُ عملٍ دقيقٍ وقابلٍ للتكرارِ، ومعرَّضٍ للمحاسبةِ الشديدةِ، حيث العيِّناتُ قيدَ التحكُّمِ. وعلى الرغمِ من أن الكيميائيَّ التحليليَّ يعملُ في حقولِ الكيمياءِ كافَّةً، فإنه أكثرُ جدوى في مجالِ كيمياءِ البيئةِ التي تتضمَّنُ فحصَ عيِّناتِ الهواءِ والماءِ والتربةِ، فحصًا تستفيدُ من نتائجِهِ وكالاتُ البيئةِ المتخصِّصةِ، كالهيئةِ الاتحاديَّةِ للبيئةِ في أبو ظبي Federal Environmental Agency (FEA).

(أ) (ب)

الشكل 4-8 تغيِّرُ الكواشفُ ألوانَها عند نقطةِ نهايةِ المعايرةِ. (أ) عند المعايرةِ بقاعدةٍ يتحوَّلُ الفينولفثالين إلى اللونِ الزهريِّ عند نقطةِ النهايةِ. (ب) عند المعايرةِ بحمضٍ يتحوَّلُ أحمرُ الميثيل إلى اللونِ الأحمرِ عند نقطةِ النهايةِ.



(أ)



(ب)

الشكل 4-9 (أ) عند معايرةِ 50.0 mL من حمضٍ قويٍّ مثل 1.00 M HCl مع قاعدةٍ قويَّةٍ مثل 1.00 M NaOH، تحصلُ نقطةُ التكافؤِ عند pH = 7.00. (ب) عند معايرةِ 50.0 mL من حمضٍ ضعيفٍ مثل $1.00\ M\ CH_3COOH$ مع قاعدةٍ قويَّةٍ مثل 1.00 M NaOH، تحصلُ نقطةُ التكافؤِ عند pH أعلى من 7.00.

قد تتساءلُ عن نوعِ الكاشفِ الذي يلزمُ لتحديدِ نقطةِ تكافؤِ معايرةِ الأحماضِ الضعيفةِ/القواعدِ الضعيفةِ. فالجوابُ هو أنه لا يوجدُ مثلُ هذا الكاشفِ قطعًا. لأن pH لنقطةِ تكافؤِ الأحماضِ الضعيفةِ/القواعدِ الضعيفةِ غيرُ محدَّدةٍ، ويمكنُ أن تأخذَ أيَّ قيمةٍ تبعًا للقوةِ النسبيَّةِ للمتفاعلاتِ. في هذه الحالةِ لا يساعدُ كثيرًا تغيُّرُ لونِ الكاشفِ في تحديدِ ما إذا كان التفاعلُ بين هذه الأحماضِ والقواعدِ تامًّا أو لا.

عند إجراءِ المعايرةِ، يمكنُ القيامُ بإضافاتٍ متعاقبةٍ من محلولٍ مائيٍّ لقاعدةٍ إلى حجمٍ مقيسٍ من محلولٍ مائيٍّ لحمضٍ. فلدى إضافةِ القاعدةِ تزدادُ قيمةُ pH ببطءٍ في البدايةِ، ثم يصبحُ التغيُّرُ سريعًا عبرَ نقطةِ التكافؤِ، ثم يعودُ فيبطئُ مرَّةً أخرى عندما يصبحُ المحلولُ أكثرَ قاعديَّةً. الشكل 4-9 يظهرُ منحنياتٍ لمعايرةِ حمضٍ قويٍّ/قاعدةٍ قويَّةٍ، وحمضٍ ضعيفٍ/قاعدةٍ قويَّةٍ.

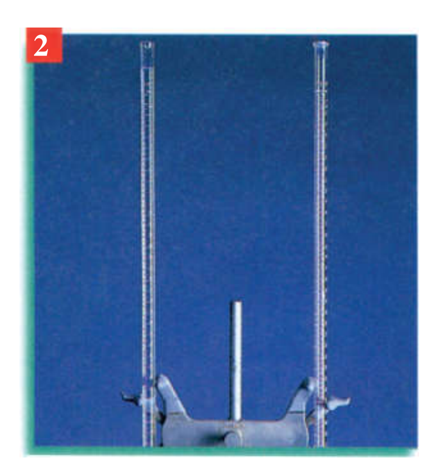
المولاريَّةُ والمعايرةُ

يبيِّنُ الشكلُ 4-10 خطواتِ القيامِ بعمليةِ المعايرةِ. فإذا عُرفَ تركيزُ أحدِ المحلولَين بدقَّةٍ، يمكنُ، عند إجراءِ المعايرةِ، حسابُ تركيزِ المحلولِ الثاني من الحجومِ المتكافئةِ كيميائيًّا. ***المحلولُ المعلومُ التركيزِ بدقةٍ يسمَّى المحلولَ القياسيَّ*** **standard solution**.

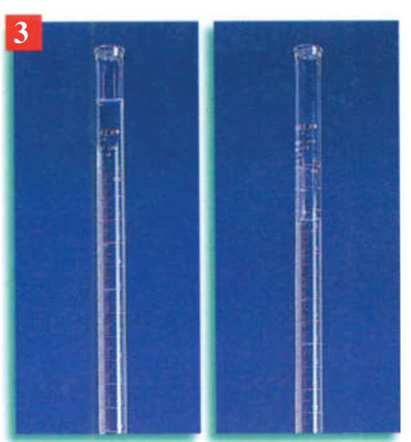
وللتأكُّدِ من تركيزِ المحلولِ القياسيِّ يجبُ مقارنةُ هذا المحلولِ أولاً بمحلولٍ قياسيٍّ أوَّليٍّ. والمادةُ القياسيَّةُ الأوليَّةُ **primary standard** ***هي مركَّبٌ صلبٌ منقًّى إلى درجةٍ عاليةٍ، ويستخدمُ للتحقُّقِ من تركيزِ المحلولِ القياسيِّ في المعايرةِ.*** يحضَّرُ المحلولُ القياسيُّ بالتركيزِ المطلوبِ، ثم يُحدَّدُ التركيزُ بدقَّةٍ أكثرَ من خلالِ معايرةِ المحلولِ مع كميَّةٍ من محلولٍ قياسيٍّ أوَّليٍّ مقيسةٍ بعنايةٍ ودقَّةٍ.

الشكل 4-10 فيما يلي طريقةٌ لإجراءِ معايرةِ حمض–قاعدة. لضمانِ الحصولِ على قيمةٍ دقيقةٍ يجبُ تكرارُ المعايرةِ حتى يتمَّ الحصولُ على ثلاثِ نتائجَ متقاربةٍ. ويستخدمُ محلولٌ قاعديٌّ قياسيٌّ في هذه العمليَّةِ لتحديدِ التركيزِ المجهولِ لأحدِ الأحماض.

علِّقْ سحاحتَينِ نظيفتَينِ على الحاملِ كما هو مبيَّنٌ. حدِّدْ أيُّ السحاحتَينِ ستُستخدمُ للقاعدةِ، وأيُّهما للحمض. اغسلْ سحاحةَ الحمضِ بالحمضِ المرادِ معايرتُهُ ثلاثَ مرّاتٍ، ثم اغسلْ سحاحةَ القاعدةِ بالقاعدةِ المستخدمةِ في المعايرةِ ثلاثَ مرّاتٍ أيضًا.



املأ السحاحةَ الأولى بالحمضِ المجهولِ التركيزِ حتى نقطةٍ فوقَ علامةِ التعييرِ 0 mL.



حرِّرْ قليلاً من الحمضِ من السحاحةِ للتخلُّصِ من أيِّ فقاعاتِ هواءٍ ولخفضِ الحجمِ إلى الجزءِ المعيَّرِ من السحاحةِ.

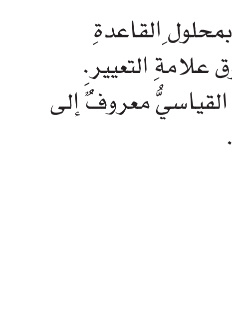
سجِّلْ حجمَ الحمضِ في السحاحةِ مقرَّبًا إلى 0.01 mL، واعتبرْهُ الحجمَ الابتدائيَّ. تذكَّرْ أن تقرأ الحجمَ عند الحافةِ السفليَّةِ لتقعُّرِ سطحِ السائل.

انقلْ حجمًا من الحمضِ سبقَ أن حدَّدَهُ معلمُكَ إلى دورقٍ مخروطيٍّ نظيفٍ.

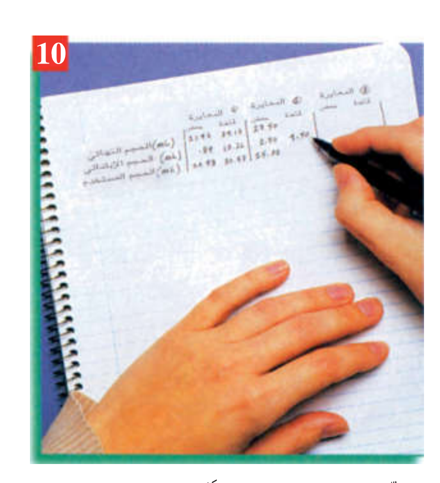
اطرحْ من القراءةِ النهائيَّةِ الحجمَ الابتدائيَّ المقيسَ على السحاحةِ. وهذا الحجمُ يساوي الحجمَ المضبوطَ للحمضِ المضافِ إلى الدورقِ. سجِّلِ النتيجةَ مقرَّبةً إلى 0.01 mL.

أضفْ ثلاثَ قطراتٍ من الكاشفِ المناسبِ (في هذه الحالةِ هو الفينولفثالين) إلى الدورقِ.

املأ السحاحةَ الثانيةَ بمحلولِ القاعدةِ القياسيِّ حتى نقطةٍ فوقَ علامةِ التعييرِ. تركيزُ محلولِ القاعدةِ القياسيُّ معروفٌ إلى درجةٍ معيَّنةٍ من الدقَّةِ.



حرِّرْ قليلاً من القاعدةِ من السحاحةِ للتخلُّصِ من أيِّ فقاعاتِ هواءٍ، ولتخفضَ الحجمَ إلى الجزءِ المعيَّرِ من السحاحةِ.



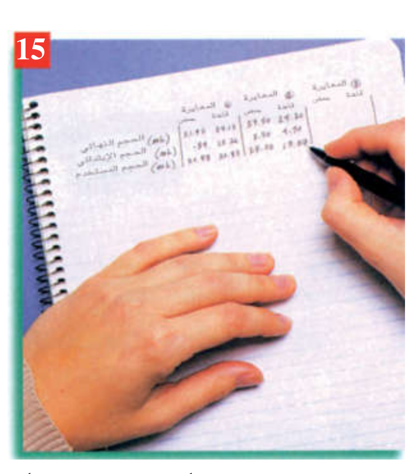
سجِّلْ حجمَ القاعدةِ مقرَّبًا إلى 0.01 mL واعتبرْهُ الحجمَ الابتدائيَّ. تذكَّرْ أن تقرأ الحجمَ عند الحافةِ السفليَّةِ لتقعُّرِ سطحِ السائلِ.

ضع الدورقَ المخروطيَّ تحت السحاحةِ، كما يظهرُ في الشكلِ. لاحظْ أن طرفَ السحاحةِ داخلٌ في عنقِ الدورقِ.

أضفْ ببطءٍ القاعدةَ من السحاحةِ إلى الدورقِ وأنت تحرِّكُ الدورقَ بشكلٍ دائريٍّ. يجبُ أن يتلاشى اللونُ الزهريُّ للكاشفِ أثناءَ التحريكِ.

تقتربُ المعايرةُ من نقطةِ النهايةِ عندما يبقى اللونُ الزهريُّ لفترةٍ أطولَ. عند هذه النقطةِ أضفِ القاعدةَ إلى الدورقِ قطرةً فقطرةً.

تصلُ المعايرةُ إلى نقطةِ التكافؤِ عندما يبقى اللونُ الزهريُّ الخفيفُ فترةً تقاربُ الـ 30 ثانيةً من التحريكِ المستمرِّ.



اطرحْ من القراءةِ النهائيَّةِ الحجمَ الابتدائيَّ المقيسَ على السحاحةِ. وستمثِّلُ هذه قيمةَ الحجمِ المضبوطِ للقاعدةِ المضافةِ إلى الدورقِ. سجِّلِ النتيجةَ مقرَّبةً إلى 0.01 mL.

يُستخدمُ المحلولُ المعلومُ لتحديدِ مولاريَّةِ محلولٍ آخرَ بواسطةِ المعايرةِ. افترضْ أنك تحتاجُ إلى 20.0 mL من 5.0×10^{-3} M NaOH للوصولِ إلى نقطةِ النهايةِ في معايرةِ 10.0 mL من HCl مجهولِ التركيزِ. كيف يمكنُكَ استخدامُ بياناتِ المعايرةِ هذه لتحديدِ مولاريَّةِ المحلولِ الحمضيِّ؟

ابتدئْ بمعادلةِ تفاعلِ التعادلِ الموزونةِ. وحدِّدْ، انطلاقًا منها، كمِّيَّتَيِ HCl و NaOH المتكافئتَيْنِ كيميائيًّا.

$$\underset{1\ mol}{HCl(aq)} + \underset{1\ mol}{NaOH(aq)} \rightarrow \underset{1\ mol}{NaCl(aq)} + \underset{1\ mol}{H_2O(l)}$$

احسبْ عددَ مولاتِ NaOH المستخدمةِ في المعايرةِ.

$$\frac{5.0 \times 10^{-3}\ mol\ NaOH}{1\ \cancel{L}} \times \frac{1\ \cancel{L}}{1000\ \cancel{mL}} \times 20.0\ \cancel{mL} = 1.0 \times 10^{-4}\ mol\ NaOH$$

وبما أنك تحتاجُ إلى 1 mol NaOH لمعادلةِ 1 mol HCl، فإنه يجبُ أن تكونَ كميَّةُ HCl في المعايرةِ مساويةً لـ 1.0×10^{-4} mol. يمكنُ تأكيدُ هذه النتيجةِ من المعادلةِ التاليةِ:

$$1.0 \times 10^{-4}\ \cancel{mol\ NaOH} \times \frac{1\ mol\ HCl}{1\ \cancel{mol\ NaOH}} = 1.0 \times 10^{-4}\ mol\ HCl$$

وهذه الكميَّةُ من الحمضِ يجبُ أن تكونَ في 10.0 mL من محلولِ HCl المستخدمِ في المعايرةِ. يمكنُ الآنَ حسابُ مولاريةِ محلولِ HCl، كما يلي:

$$\frac{1 \times 10^{-4}\ mol\ HCl}{10.0\ \cancel{mL}} \times \frac{1000\ \cancel{mL}}{1\ L} = \frac{1.0 \times 10^{-2}\ mol\ HCl}{1\ L}$$

$$= 1.0 \times 10^{-2}\ M\ HCl$$

وتلخِّصُ المسألةُ النموذجيَّةُ 4-6 الخطواتِ الأربعَ التاليةَ:

1. ابدأْ بالمعادلةِ الموزونةِ لتفاعلِ التعادلِ لتحدِّدَ كميَّتَيِ الحمضِ والقاعدةِ المتكافئتَينِ كيميائيًّا.
2. حدِّدْ عددَ مولاتِ الحمضِ (أو القاعدةِ) من المحلولِ المعلومِ المستخدمِ في المعايرةِ.
3. حدِّدْ عددَ مولاتِ المذابِ في المحلولِ المجهولِ المستخدمِ في المعايرةِ.
4. حدِّدْ مولاريَّةَ المحلولِ المجهولِ.

مسألةٌ نموذجية 4-6

أضيفَ في عمليَّةِ معايرةٍ 27.4 mL من $0.0154\ M\ Ba(OH)_2$ إلى 20.0 mL من محلولِ HCl المجهولِ التركيزِ للوصولِ إلى نقطةِ التكافؤِ. احسبْ مولاريَّةَ المحلولِ الحمضيِّ.

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: حجمُ المحلولِ وتركيزُه = 27.4 mL من $0.0154\ M\ Ba(OH)_2$

حجمُ محلولِ HCl المجهولِ = 20.0 mL

المجهول: مولاريَّةُ المحلولِ الحمضيِّ

2 **خطِّطْ**

1. معادلةُ التعادلِ الموزونةُ ← الكميّاتِ المتكافئةَ كيميائيًّا

$$\underset{1\ mol}{Ba(OH)_2} + \underset{2\ mol}{2HCl} \rightarrow \underset{1\ mol}{BaCl_2} + \underset{2\ mol}{2H_2O}$$

2. حجمُ المحلولِ القاعديِّ المعلومِ المستخدمِ (mL) ← كميَّةَ القاعدةِ المستخدمةِ (mol)

$$\frac{mol\ Ba(OH)_2}{1\ L} \times Ba(OH)_2 \text{ من محلول } mL \times \frac{1\ L}{1000\ mL} = mol\ Ba(OH)_2$$

3. النسبةُ الموليَّةُ، عددُ مولاتِ القاعدةِ المستخدمةِ ← عددَ مولاتِ الحمضِ المستخدمةِ من المحلولِ المجهولِ

$$\frac{2\ mol\ HCl}{1\ mol\ Ba(OH)_2} \times mol\ Ba(OH)_2 \text{ في المحلولِ المعلومِ } = mol\ HCl \text{ في المحلولِ المجهولِ}$$

4. حجمُ المجهولِ، عددُ مولاتِ المذابِ في المجهولِ ← مولاريةَ المجهولِ

$$\frac{\text{كميَّة المذابِ في المحلولِ المجهولِ (mol)}}{\text{حجمِ المحلولِ المجهولِ (mL)}} \times \frac{1000\ mL}{1\ L} = \text{مولارية المحلولِ المجهولِ}$$

3 **احسبْ**

1. النسبةُ الموليَّةُ من المعادلةِ هي $1\ mol\ Ba(OH)_2$ لكلِّ $2\ mol\ HCl$.

2. $$\frac{0.0154\ mol\ Ba(OH)_2}{1\ \cancel{L}} \times \frac{1\ \cancel{L}}{1000\ \cancel{mL}} \times 27.4\ \cancel{mL} = 4.22 \times 10^{-4}\ mol\ Ba(OH)_2$$

3. $$\frac{2\ mol\ HCl}{1\ \cancel{mol\ Ba(OH)_2}} \times 4.22 \times 10^{-4}\ \cancel{mol\ Ba(OH)_2} = 8.44 \times 10^{-4}\ mol\ HCl$$

4. $$\frac{8.44 \times 10^{-4}\ mol\ HCl}{20.0\ \cancel{mL}} \times \frac{1000\ \cancel{mL}}{1\ L} = \frac{4.22 \times 10^{-2}\ mol\ HCl}{1\ L} = 4.22 \times 10^{-2}\ M\ HCl$$

تمارينُ تطبيقيةٌ

1. في تجربةِ المعايرةِ، احتاجَتْ عيِّنةٌ من محلولِ $0.215\ M\ KOH$ حجمُها $15.5\ mL$ إلى $21.2\ mL$ من محلولِ حمضِ الأسيتيكِ. احسبْ مولاريَّةَ محلولِ حمضِ الأسيتيكِ.

2. في تجربةِ معايرةٍ $17.6\ mL$ من محلولِ H_2SO_4 تعادلُ $27.4\ mL$ من محلولِ $0.0165\ M\ LiOH$. فما مولاريَّةُ المحلولِ الحمضيِّ؟

الجواب

1. $0.157\ M\ CH_3COOH$

2. $0.0128\ M\ H_2SO_4$

مراجعةُ القسمِ 2-4

1. ما الكاشفُ المناسبُ لمعايرةِ ما يلي:

أ. حمضٌ قويٌّ وقاعدةٌ ضعيفةٌ

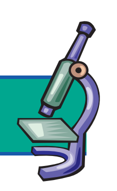
ب. قاعدةٌ قويَّةٌ وحمضٌ ضعيفٌ

2. إذا لزمَ $20.0\ mL$ من محلولِ $0.0100\ M\ HCl$ لمعادلةِ $30.0\ mL$ من محلولِ $NaOH$. فكم تكونُ مولاريَّةُ محلولِ $NaOH$؟

3. لنفترضْ أنه يلزمُ $20.0\ mL$ من محلولِ $0.010\ M\ Ca(OH)_2$ لمعادلةِ $12.0\ mL$ من محلولِ HCl. فما مولاريَّةُ محلولِ HCl؟

تفكيرٌ ناقدٌ

4. **توقعْ نتائجَ:** ارسمْ منحنى عمليَّةِ معايرةِ $50.0\ mL$ من محلولِ $0.10\ M\ NH_3$ مع محلولِ $0.10\ M\ HCl$.



قراءةٌ علميَّةٌ

الكلسُ في تربةِ الإماراتِ

تعدُّ تربةُ الإماراتِ تربةً قاعديَّةً، يتراوحُ الرقمُ الهيدروجينيُّ لها بين 7.8 و 8.5. ويرجعُ ارتفاعُ الرقمِ الهيدروجينيِّ لهذه التربةِ إلى ارتفاعِ محتواها من كربوناتِ الكالسيومِ $CaCO_3$ الذي تتراوحُ نسبتُهُ بين 12% و 43% ك/ك.

وقد انعكسَ تأثيرُ ارتفاعِ الرقمِ الهيدروجينيِّ للتربةِ على مناحٍ عديدةٍ في البيئةِ الإماراتيَّةِ. فمثلاً النباتاتُ الطبيعيَّةُ هي، في مجملِها، نباتاتٌ صحراويَّةٌ تعيشُ في تربةٍ ملحيَّةٍ (عاليةِ الرقمِ الهيدروجينيِّ)، وتتميَّزُ بقدرتِها العاليةِ على الاحتفاظِ بالماءِ والتعايشِ مع ندرتِهِ في تلك البيئةِ. ولما كانتِ الحاجةُ ملحَّةً هناك لزراعةِ أنواعٍ من النباتاتِ الغذائيةِ أو المحاصيلِ الزراعيةِ كان لا بدَّ من تعديلِ هذه التربةِ، وذلك بخفضِ رقمِها الهيدروجينيِّ. فعمدَتْ بعضُ المزارعِ إلى إضافةِ محاليلَ حمضيَّةٍ مخفَّفةٍ لكلٍّ من حمضِ النيتريكِ HNO_3 وحمضِ الفوسفوريكِ H_3PO_4، فهذه المحاليلُ الحمضيَّةُ تحدُّ من قاعديَّةِ التربةِ وذلك بخفضِ رقمِها الهيدروجينيِّ، وتكسِبُ هذه التربةَ الفقيرةَ نسبيًّا عناصرَ غذائيَّةً مهمَّةً للنباتِ، كالنيتروجينِ والفوسفورِ، والتي تعملُ على زيادةِ خصوبةِ التربةِ.

ولكن، كما هو معروفٌ، لكلِّ عمليةِ معالجةٍ كيميائيَّةٍ آثارُها الجانبيَّةُ. إن إضافةَ الأحماضِ، إن لم تكنْ محسوبةً بدقَّةٍ، تؤدّي إلى تسرُّبِ أيوناتِ النيتراتِ NO_3^- الفائضةِ إلى المياهِ الجوفيَّةِ، حيث يُخشى أن يتمَّ اختزالُها إلى أيوناتِ النيتريتِ NO_2^- ذاتِ السمِّيَّةِ العاليةِ. أما إضافةُ حمضِ الفوسفوريكِ المخفَّفِ فتبقى أكثرَ أمانًا، لأن ناتجَ تفاعلِه مع كربوناتِ الكالسيومِ يعطي فوسفاتِ الكالسيومِ الذي يتَّسمُ بقابليَّةٍ منخفضةٍ للذوبانِ، وهو بالتالي أكثرُ أمانًا، لأنه لا يتسرَّبُ إلى المياهِ الجوفيَّةِ.

$$CaCO_3 + H_3PO_4 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + CO_2 + H_2O$$

ولكربوناتِ الكالسيومِ في تربةِ الإماراتِ جوانبُ مهمَّةٌ. فهي بمثابةِ مصيدةٍ جيدةٍ لكاتيوناتِ الفلزّاتِ الثقيلةِ السامَّةِ، مثل Pb^{2+} و Hg^+، التي تتَّحدُ في حالةِ سكبِها في البيئةِ مع أنيوناتِ الكربوناتِ CO_3^{2-} مكوِّنةً كربوناتِ الفلزِّ الثقيلِ، وهي في مجملِها مركَّباتٌ غيرُ قابلةٍ للذوبانِ في الماءِ، يتمُّ حبسُها في الطبقةِ السطحيَّةِ ولا يسمحُ بتسرُّبِها إلى المياهِ الجوفيَّةِ.

أسئلة

1. ما أضرارُ ارتفاعِ الرقمِ الهيدروجينيِّ للتربةِ في الإماراتِ، وما فوائدُهُ؟
2. أيهما تفضِّلُ، معالجةَ التربةِ بحمضِ النيتريكِ أم معالجتَها بحمضِ الفوسفوريكِ؟ ولماذا؟

مراجعةُ الفصل 4

ملخّصُ الفصل

1-4

- يتأيَّنُ الماءُ النقيُّ ذاتيًّا ليعطيَ 1.0×10^{-7} M H_3O^+ و 1×10^{-7} M OH^- عند درجةِ حرارةِ 25°C.
- $pH = -\log [H_3O^+]$
  $pOH = -\log [OH^-]$
  عند درجةِ حرارةِ 25°C يكونُ: $pH + pOH = 14.0$
- عند درجةِ حرارةِ 25°C، pH للأحماضِ أقلُّ من 7، و pH للقواعدِ أكثرُ من 7، و pH للمحاليلِ المتعادلةِ يساوي 7.
- إذا احتوى المحلولُ على حمضٍ قويٍّ أو قاعدةٍ قويَّةٍ يمكنُ حسابُ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ و pH من مولاريَّةِ المحلولِ. وإذا احتوى المحلولُ على حمضٍ ضعيفٍ أو قاعدةٍ ضعيفةٍ، يجبُ حسابُ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ من pH المقيسِ عمليًّا.

المفردات

التأيُّنُ الذاتيُّ للماءِ (95) self-ionization of water

الرقمُ الهيدروجينيُّ pH (99)

الرقمُ الهيدروكسيديُّ pOH (99)

2-4

- يقاسُ pH لمحلولٍ إما باستخدامِ مقياسِ pH أو كواشفِ الحمضِ–القاعدةِ.
- تَستخدِمُ المعايرةُ محلولاً معلومَ التركيزِ لتحدِّدَ تركيزَ محلولٍ مجهولِ التركيزِ.
- لتحديدِ نقطةِ النهايةِ يجبُ اختيارُ كواشفَ تغيِّرُ ألوانَها ضمنَ مدًى يتضمَّنُ pH لنقطةِ التكافؤ.
- عند معرفةِ مولاريَّةِ وحجمِ محلولٍ مستخدمٍ في عمليَّةِ المعايرةِ يمكنُ إيجادُ مولاريَّةِ حجمٍ معطًى لمحلولٍ مجهولِ التركيزِ.

المفردات

كواشفُ الحمضِ–القاعدةِ (107) acid-base indicators

المدى الانتقاليُّ (108) transition interval

مقياسُ pH (108) pH meter

المعايرةُ (111) titration

نقطةُ التكافؤ (112) equivalence point

نقطةُ النهايةِ (112) end point

المحلولُ القياسيُّ (113) standard solution

المادةُ القياسيَّةُ الأوليَّةُ (113) primary standard

مراجعةُ الفصل 4

اختيارٌ من متعدِّد

1. يحتوي الماءُ المقطَّرُ على
أ. H_2O
ب. H_3O^+
ج. OH^-
د. جميعِ ما سبقَ

2. ما قيمةُ pH لمحلولِ $0.0010\ M\ HNO_3$؟
أ. 1.0
ب. 3.0
ج. 4.0
د. 5.0

3. أيٌّ من المحاليلِ التاليةِ تزيدُ فيه قيمةُ pH عن 7؟
أ. $[OH^-] = 2.4 \times 10^{-2}\ M$
ب. $[H_3O^+] = 1.53 \times 10^{-2}\ M$
ج. $0.0001\ M\ HCl$
د. $[OH^-] = 4.4 \times 10^{-9}\ M$

4. إذا عُرفَ pH لمحلولِ قاعدةٍ قويَّةٍ كـ NaOH، فأيٌّ من خصائص هذا المحلول يمكنُ حسابُها؟
أ. التركيزُ المولاريُّ
ب. $[OH^-]$
ج. $[H_3O^+]$
د. جميعُ ما سبقَ

5. محلولٌ مائيٌّ متعادلٌ
أ. له تركيزُ H_3O^+ مساوٍ لـ 7.0
ب. لا يحتوي على أيوناتِ الهيدرونيوم ولا على أيوناتِ الهيدروكسيد.
ج. له عددٌ متساوٍ من أيوناتِ الهيدرونيوم والهيدروكسيدِ.
د. لا شيءَ مما وردَ.

6. ما الملحُ الذي يتكوَّنُ عند تفاعلِ محلولِ HNO_3 مع محلول الأمونيا؟
أ. نيتراتُ الأمونيوم
ب. نيتريتُ الأمونيوم
ج. نيتريدُ الأمونيوم
د. أكسيدُ الأمونيوم

7. قيمةُ pH لمحلولٍ هي 6.32. فما قيمةُ pOH؟
أ. 6.32
ب. 4.8×10^{-7}
ج. 7.68
د. 2.1×10^{-8}

8. تتأثَّرُ قيمةُ K_w للماءِ بـ
أ. إذابةِ ملحٍ في المحلولِ.
ب. التغيُّرِ في درجةِ الحرارةِ.
ج. التغيُّرِ في تركيزِ أيونِ الهيدروكسيدِ.
د. وجودِ حمضٍ قويٍّ.

9. أيٌّ من قيمِ pH التاليةِ هو الأعلى حمضيَّةً؟
أ. $pH = 1$
ب. $pH = 5$
ج. $pH = 9$
د. $pH = 13$

مراجعةُ المفاهيم

10. فسِّرْ لماذا الماءُ النقيُّ موصِّلٌ كهربائيٌّ ضعيفٌ جدًّا؟

11. ماذا يُقصدُ من وضعِ صيغةِ أيونٍ معيَّنٍ أو صيغةِ جزيءٍ بين قوسَين؟

12. أ. ما قيمةُ $[H_3O^+]$ في الماءِ المقطَّرِ عند درجةِ حرارةِ 25°C؟
ب. هل تبقى القيمةُ هي نفسَها عند جميعِ درجاتِ الحرارةِ؟ لماذا؟

13. أ. ما الذي يصحُّ دائمًا فيما يخصُّ قيمةَ $[H_3O^+]$ للمحاليلِ الحمضيَّةِ؟
ب. ما الذي يصحُّ فيما يخصُّ قيمةَ $[H_3O^+]$ للمحاليلِ الحمضيَّةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C؟

14. أ. وضِّحِ المقصودَ بـ pH للمحلولِ.
ب. اكتبِ العلاقةَ الرياضيَّةَ المستخدمةَ لحسابِ pH.
ج. ما المقصودُ باللوغاريتمِ للأساسِ 10 لعددٍ ما. وضِّحْ إجابتَك بمثالٍ.

15. حددْ نوعَ كلٍّ من المحاليلِ التاليةِ الموجودةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C، أهي حمضيَّةٌ أم قاعديَّةٌ أم متعادلةٌ؟
أ. $[H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-7}\ M$
ب. $[H_3O^+] = 1.0 \times 10^{-10}\ M$
ج. $[OH^-] = 1.0 \times 10^{-7}\ M$
د. $[OH^-] = 1.0 \times 10^{-11}\ M$
هـ. $[H_3O^+] = [OH^-]$
و. $pH = 3.0$
ز. $pH = 13.0$

16. مستعينًا بالجدولِ (4-3) رتِّبِ الموادَّ التاليةَ تصاعديًّا تبعًا لقيمِ pH:
أ. البيض
ب. التفاح
ج. الطماطم
د. الحليب
هـ. الموز
و. البطاطا
ز. الليمون
ح. حليبَ المغنيسيا
ط. ماءَ البحرِ

17. ما المقصودُ بالمدى الانتقاليِّ للكاشفِ؟

18. وضحْ كيف يؤثِّرُ تغيُّرُ قيمةِ pH في لونِ الكاشفِ؟

19. أ. كيفَ يمكنُكَ أن تحدِّدَ نقطةَ التكافؤِ في تجربةِ معايرةٍ، أو pH للمحلولِ، دون استخدامِ كاشفٍ؟

ب. ما الذي يمكنُ ملاحظتُهُ حول معدل تغيُّرِ pH لمحلولٍ يقتربُ من نقطةِ نهايةِ معايرةٍ؟

20. أ. ما المقصودُ بنقطةِ نهايةِ معايرةٍ؟

ب. ما دورُ الكاشفِ في عمليَّةِ المعايرةِ؟

ج. ما الأساسُ الذي يتمُّ بموجبِهِ اختيارُ كاشفٍ في عمليَّةِ المعايرةِ؟

21. حددْ قيمةَ pH التقريبيَّةَ عند نقطةِ نهايةِ كلِّ نوعٍ من عمليّاتِ المعايرةِ الأربعِ وهي: حمضٌ قويٌّ–قاعدةٌ قويَّةٌ، حمضٌ قويٌّ–قاعدةٌ ضعيفةٌ، حمضٌ ضعيفٌ–قاعدةٌ قويَّةٌ، حمضٌ ضعيفٌ– قاعدةٌ ضعيفةٌ، مبيّنًا اسمَ الكاشفِ الأنسبِ لتحديدِ نقطةِ النهايةِ.

22. استخدمِ الشكل 4-9 أ و 4-9 ب لرسمِ منحنى pH لمعايرةِ حمضٍ قويٍّ/قاعدةٍ ضعيفةٍ.

23. يكونُ محلولٌ مجهولٌ لدى اختبارِهِ مع الفينولفثالين عديمَ اللونِ، لكنه يتحوَّلُ إلى اللونِ الأحمرِ مع الكاشفِ «أحمرِ الفينول». استخدمْ هذه المعلومةَ لإيجادِ قيمةِ pH التقريبيَّةِ للمحلولِ (مستعينًا بالجدولِ 4-6).

مسائل

حسابات pH

24. احسبْ $[H_3O^+]$ و $[OH^-]$ لكلٍّ مما يلي. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 4-1)

أ. $0.030\ M\ HCl$

ب. $1.0 \times 10^{-4}\ M\ NaOH$

ج. $5.0 \times 10^{-3}\ M\ HNO_3$

د. $0.010\ M\ Ca(OH)_2$

25. احسبْ pH لكلٍّ من المحاليلِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 4-2)

أ. $1.0 \times 10^{-2}\ M\ HCl$

ب. $1.0 \times 10^{-3}\ M\ HNO_3$

ج. $1.0 \times 10^{-5}\ M\ HI$

د. $1.0 \times 10^{-4}\ M\ HBr$

26. تبعًا لقيمِ $[OH^-]$ التاليةِ، احسبْ pH لكلِّ محلولٍ:

أ. $1.0 \times 10^{-6}\ M$

ب. $1.0 \times 10^{-9}\ M$

ج. $1.0 \times 10^{-2}\ M$

د. $1.0 \times 10^{-7}\ M$

27. احسبْ pH لكلٍّ من المحاليلِ التاليةِ:

أ. $1.0 \times 10^{-2}\ M\ NaOH$

ب. $1.0 \times 10^{-3}\ M\ KOH$

ج. $1.0 \times 10^{-4}\ M\ LiOH$

28. احسبْ pH للمحاليلِ ذاتِ القيمِ $[H_3O^+]$ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 4-3)

أ. $2.0 \times 10^{-5}\ M$

ب. $4.7 \times 10^{-7}\ M$

ج. $3.8 \times 10^{-3}\ M$

29. تبعًا لقيمِ pH التاليةِ، احسبْ $[H_3O^+]$ لكلِّ محلولٍ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 4-4)

أ. 3.0

ب. 7.00

ج. 11.0

د. 5.0

30. تبعًا لقيمِ pH التاليةِ، احسبْ $[OH^-]$ لكلِّ محلولٍ.

أ. 7.00

ب. 11.00

ج. 4.00

د. 6.00

31. احسبْ $[H_3O^+]$ للمحاليلِ ذاتِ قيمِ pH التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 4-5)

أ. 4.23

ب. 7.65

ج. 9.48

32. تبلغُ قيمةُ pH لمحلولِ حمضِ النيتريكِ 2.70. احسبْ ما يلي:

أ. $[H_3O^+]$

ب. $[OH^-]$

ج. عددَ مولاتِ HNO_3 اللازمةِ لتحضيرِ 5.50 L من المحلولِ.

د. كتلةَ HNO_3 في المحلولِ المذكورِ في الخطوةِ (ج).

المعايرة

33. في كلٍّ من معايراتِ الحمضِ–القاعدةِ التاليةِ، احسبْ عددَ مولاتِ المادةِ الأولى لتكونَ من الناحيةِ الكميَّةِ مكافئةً كيميائيًّا للمادةِ الثانية:

أ. 1.0 mol HCl مع NaOH

ب. 0.75 mol KOH مع HNO_3

ج. 0.20 mol HF مع $Ba(OH)_2$

د. 0.90 mol $Mg(OH)_2$ مع H_2SO_4

34. افترضْ أنه يلزمُ 15.0 mL من محلولِ 2.50×10^{-2} M H_2SO_4 لمعادلة 10.0 mL من محلول KOH. ما مولاريَّةُ محلولِ KOH؟ (انظرِ المسألةَ النموذجيَّة 4-6)

35. في تجربةِ معايرةٍ وُجِدَ أن عيّنةً حجمُها 12.5 mL من محلولِ 1.75×10^{-2} M $Ba(OH)_2$ تكفي لمعادلة 14.5 mL من محلولِ HNO_3. احسبْ مولاريَّةَ محلولِ HNO_3.

مراجعةٌ متنوعة

36. أ. ما قيمةُ $[OH^-]$ في محلولِ 4.0×10^{-4} M $Ca(OH)_2$؟

ب. ما قيمةُ $[H_3O^+]$ في هذا المحلول؟

37. احسبْ قيمةَ pH لكلٍّ من المحاليلِ ذاتِ قيمِ $[H_3O^+]$ التالية:

أ. 1.0×10^{-7} M

ب. 1.0×10^{-3} M

ج. 1.0×10^{-12} M

د. 1.0×10^{-5} M

38. ما قيمةُ $[H_3O^+]$ لمحلولٍ ذي $pH = 6.0$؟

39. ما قيمةُ pH لمحلولِ 5.0×10^{-5} M $Ba(OH)_2$؟

40. أ. احسبْ pH لمحلولٍ قيمةُ $[H_3O^+]$ فيه 8.4×10^{-11} M.

ب. احسبْ قيمةَ $[H_3O^+]$ لمحلولٍ ذي $pH = 2.50$.

41. أ. ما تركيزُ OH^- في محلولِ هيدروكسيدِ المغنيسيومِ 5.4×10^{-5} M $Mg(OH)_2$.

ب. احسبْ تركيزَ H_3O^+ في هذا المحلول.

42. أ. احسبْ مولاريَّةَ H_3O^+ في محلولٍ له $pH = 8.90$.

ب. احسبْ تركيزَ OH^- في هذا المحلول.

43. ما قيمةُ pH لمحلولٍ تبلغُ قيمةُ $[OH^-]$ فيه 6.9×10^{-10} M؟

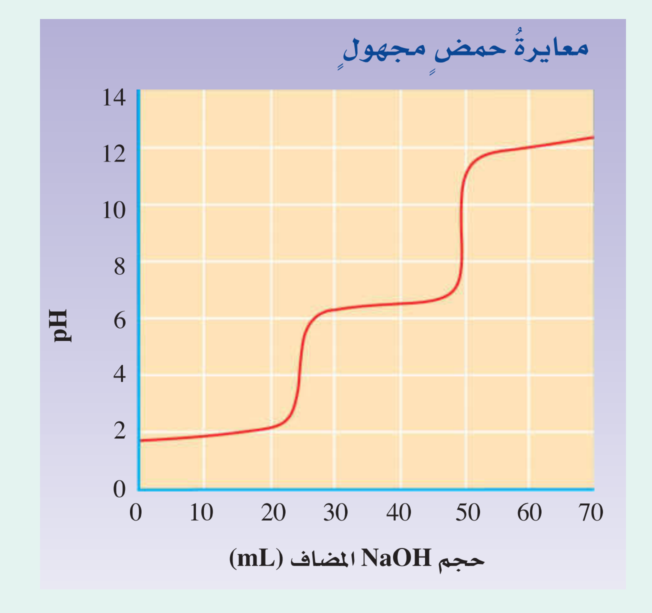
44. في عمليَّةِ معايرةٍ تبيّنَ أن 25.9 mL من محلولِ 3.4×10^{-3} M $Ba(OH)_2$ تعادلُ 16.6 mL من محلولِ HCl. ما مولاريَّةُ محلولِ HCl؟

45. جدْ مولاريَّةَ $Ca(OH)_2$، إذا علمْتَ أن 428 mL من المحلولِ تتعادلُ مع 115 mL من 6.7×10^{-3} M HNO_3 في عمليَّةِ معايرة.

46. افترضْ أن 10.1 mL من HNO_3 تتعادلُ مع 71.4 mL من محلولِ 4.2×10^{-3} M KOH في عمليَّةِ المعايرة. احسبْ تركيزَ محلولِ HNO_3.

تفكيرٌ ناقد

47. تفسيرُ رسمٍ بياني: نتجَ الرسمُ البيانيُّ التالي عن معايرةِ حمضٍ مجهولٍ مع 0.10 M NaOH. حلِّلِ المنحنى رابطًا استنتاجَكَ بنوعيَّةِ المحلولِ الحمضيّ.



بحثٌ وكتابة

48. تفحّصْ ملصقاتِ لخمسةِ أنواعٍ، على الأقلِّ، من أنواعِ شامبو، ولاحظْ ما كُتِبَ (إن وُجِد) بخصوصِ pH الشامبو. أجرِ بحثًا لاستقصاءِ سببِ اختيارِ مدى pH في أحدِ أنواعِ الشامبو، وعن الضررِ الذي قد يسبِّبُهُ للشعرِ أو للعيونِ مدًى آخرُ لـ pH. ثم اكتبْ تقريرًا عن ذلك.

49. تُستخدَمُ الأحماضُ، في الصناعةِ، لتلميعِ سطوحِ المعادنِ. قمْ بزيارةٍ إلى أحدِ مصانعِ التعدينِ في دولةِ الإماراتِ العربيَّةِ المتَّحدةِ التي تستخدمُ هذه التقنيَّةَ، واكتبْ تقريرًا علميًّا عن ذلك.

تقويمٌ بديل

50. أداء: استعملْ ورقةَ pH لتحديدِ القيمِ التقريبيَّةِ لـ pH عصيرِ الليمونِ المنتجِ في معاملَ مختلفةٍ (العلاماتُ التجاريةُ مختلفةٌ) والمحتوي على حمضِ السيتريكِ.

51. أداء: صمِّمْ ونفِّذْ تجربةً لاستخلاصِ كواشفِ الحمضِ-القاعدةِ من مصادرَ مختلفةٍ، مثلِ الملفوفِ الأحمرِ والتوتِ البرّيِّ وأوراقِ الزهورِ الملوَّنةِ. استخدمْ محاليلَ حمضيَّةً وقاعديَّةً ومتعادلةً لاختبارِ فاعليَّةِ كلِّ كاشفٍ أمكنَكَ استخلاصُه. دوِّن في تقريرٍ علميٍّ التصميمَ والنتائجَ التي توصَّلْتَ إليها.

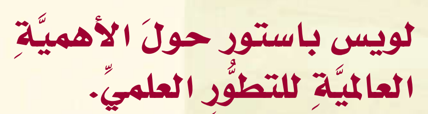
مشروعٌ علميّ

52. نفِّذْ مشروعًا علميًّا بعنوانِ «استقصاءُ الأغذيةِ الأكثرِ ملاءمةً لمريضِ الحموضةِ الزائدةِ أو قرحةِ المعدةِ».

الوَحدة

2

التفاعلاتُ الكيميائيَّةُ



لويس باستور حولَ الأهميَّةِ العالميَّةِ للتطوُّرِ العلميِّ.

لا وطنَ محدَّدًا للعلمِ.. والمعرفةُ تنتمي إلى الإنسانيَّةِ جمعاءَ. وهي الشعلةُ التي تضيءُ العالَمَ. وإذا شاءَت أمّةٌ أن تتجلّى شخصيتُها فإن العِلمَ أرفعُ ما يجسِّدُ ذلك. والأمَّةُ تتبوّأُ مكانتَها الرفيعةَ بقدرِ ما تدعمُ منجزاتِ الفكرِ والعقلِ.

(عن باستور والعلومِ الحديثةِ)

الفصـــل 5

طاقةُ التفاعلاتِ

هناك تفاعلاتٌ كيميائيَّةٌ كثيرةٌ تعطي أو تأخذُ طاقةً
على صورةِ حرارةٍ

القسم 1-5

الكيمياءُ الحراريَّةُ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يعرِّفُ درجةَ الحرارةِ ويحدِّدُ الوحداتِ التي تقاسُ بها.
- يُعرِّفُ الحرارةَ ويحدِّدُ وحداتِها.
- يجري حساباتٍ حولَ الحرارةِ النوعيَّةِ.
- يوضِّح ما المقصودُ بكلٍّ من: التغيُّر في المحتوى الحراريِّ، حرارةِ التفاعلِ، حرارةِ التكوينِ، حرارةِ الاحتراقِ.
- يحلُّ مسائلَ تتعلّقُ بحرارةِ التفاعلِ، وحرارةِ التكوينِ، وحرارةِ الاحتراقِ.

عمليًّا يصاحبُ كلَّ تفاعلٍ كيميائيٍّ تغيُّرٌ في الطاقةِ. والتفاعلاتُ الكيميائيَّةُ عادةً تنطلقُ منها طاقةٌ أو تمتصُّ طاقةً بصورةِ حرارةٍ. وقد تعلَّمْتَ في الصفِّ الحادي عشرَ أن الطاقةَ تُمتصُّ أو تنطلقُ في التغيُّراتِ الفيزيائيَّةِ، كما في عمليَّةِ انصهارِ الموادِّ الصلبةِ أو في عمليَّةِ تكثُّفِ الأبخرةِ. تُعنى **الكيمياءُ الحراريَّةُ thermochemistry** ***بدراسةِ انتقالِ الطاقةِ على صورةِ حرارةٍ الذي يصاحبُ التفاعلاتِ الكيميائيَّةَ والتغيُّراتِ الفيزيائيَّةَ.***

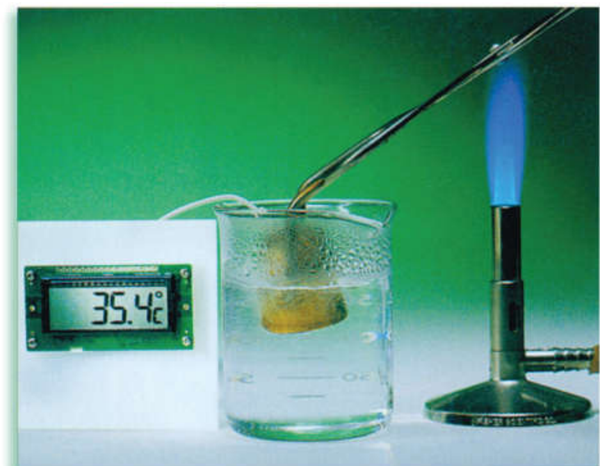
الحرارةُ ودرجةُ الحرارةِ

***تقاسُ الطاقةُ المتصةُ أو المنطلقةُ في التغيُّراتِ الكيميائيَّةِ والفيزيائيَّةِ* بالكالوريمتر calorimeter** أو **بالمسعرِ الحراريِّ**. في أحدِ أنواعِ هذا الجهازِ توضعُ كمِّيّاتٌ معلومةٌ من المتفاعلاتِ داخلَ حجرةِ تفاعلٍ مغلقةٍ بإحكامٍ مغطَّسةٍ في كمّيَّةٍ معلومةٍ من الماءِ داخلَ وعاءٍ معزولٍ. وفي هذا النظامِ تكونُ إذن الطاقةُ المتصةُ (أو المنطلقةُ) خلالَ التفاعلِ مساويةً للطاقةِ المنطلقةِ (أو المتصةِ) من الكمّيَّةِ المعلومةِ من الماءِ. وتحدَّدُ كمّيَّةُ الطاقةِ من التغيُّرِ الذي يطرأ على درجةِ حرارةِ كمّيَّةِ الماءِ المعلومةِ المحيطةِ. إن البياناتِ التي يُحصلُ عليها من تجاربِ الكالوريمتر هي تغيُّراتٌ في درجةِ الحرارةِ، وذلكَ لأنَّ الحرارةَ لا يمكنُ قياسُها مباشرةً. غير أن درجةَ الحرارةِ التي تتأثَّرُ بعمليَّةِ انتقالِ الطاقةِ الحراريَّةِ يمكنُ قياسُها بشكلٍ مباشرٍ. ولكي نعرفَ السببَ في ذلك دعنا نُعرِّفِ الحرارةَ، ودرجةَ الحرارةِ، وكيفيَّةَ قياسِ درجةِ الحرارةِ.

تعرَّفُ **درجةُ الحرارةِ temperature** ***بأنها قياسُ معدَّلِ الطاقةِ الحركيَّةِ لجسيماتِ عيِّنةٍ من المادةِ.*** وكلما زادتِ الطاقةُ الحركيَّةُ لجسيماتِ المادةِ زادتْ درجةُ الحرارةِ، وصارتِ المادةُ أكثرَ سخونةً. ومن المهمِّ معرفةُ مقياسِ درجةِ الحرارةِ. ولأغراضِ تخصُّ حساباتِ الكيمياءِ الحراريَّةِ يُستخدَمُ المقياسُ المئويُّ Celsius، ومقياسُ كلفن Kelvin. ويُربطُ هذانِ المقياسانِ عادةً بالمعادلةِ التاليةِ:

$$K = 273 + {}^{\circ}C$$

وبذلك، يكونُ قياسُ درجةِ الحرارةِ معتمدًا على عمليَّةِ انتقالِ الطاقةِ. وكمّيَّةُ الطاقةِ المنتقلةِ كحرارةٍ تقاسُ عادةً بوحدةِ الجول. و**الجول joule** ***هو وحدةُ الحرارةِ في النظامِ الدوليِّ SI ووحدةُ الأنواعِ الأخرى من الطاقةِ.*** يعبَّرُ عن الجولِ عادةً بالحرفِ J، ويشتقُّ من حاصلِ وحداتِ القوةِ والمسافةِ.



الشكل 5-1 اتجاهُ انتقالِ الطاقةِ يتحدَّدُ من خلالِ الفرقِ بين درجاتِ حرارةِ الموادِّ داخلَ نظامٍ. تنتقلُ الطاقةُ كحرارةٍ من ساقِ النحاسِ الأصفرِ الساخنِ إلى الماءِ البارد. وتستمرُّ عمليَّةُ انتقالِ الطاقةِ هذه حتى تتساوى درجتا الحرارةِ عند الساقِ النحاسيَّةِ والماءِ.

يمكنُ تعريفُ **الحرارةِ heat** ***على أنها صورةٌ للطاقةِ تنتقلُ تلقائيًّا من جسمٍ أعلى في درجةِ حرارتهِ إلى جسمٍ درجةُ حرارتهِ أقلُّ***، كما يظهرُ في الشكل 5-1. فدرجةُ حرارةِ الماءِ البارد في الكأسِ تزدادُ مع انتقالِ الطاقةِ إليه. وبالطريقةِ نفسِها تقلُّ درجةُ حرارةِ الساقِ النحاسيَّةِ الصفراءِ الساخنةِ كلما فقَدَتْ طاقةً. وعندما تصبحُ درجةُ حرارةِ الماءِ مساويةً لدرجةِ حرارةِ الساقِ النحاسيَّةِ يتوقفُ انتقالُ الطاقةِ كحرارةٍ في النظامِ.

الحرارةُ النوعيَّةُ

تعتمدُ كميةُ الطاقةِ المنتقلةِ كحرارةٍ، خلالَ عمليَّةِ التغيُّرِ في درجةِ الحرارةِ، على طبيعةِ وكتلةِ المادةِ وعلى مقدارِ التغيُّرِ في درجةِ الحرارةِ. عند تسخينِ جرامٍ من الحديدِ حتى درجةِ حرارةِ 100.0°C، ثم تبريدِهِ إلى درجةِ حرارةِ 50.0°C في الكالوريمتر، ينقلُ إلى الماءِ المحيطِ به ما مقدارُهُ 22.5 J من الطاقةِ. لكنَّ مقدارَ ما ينقلُهُ جرامٌ من الفضَّةِ هو 11.8 J من الطاقةِ، تحت الشروطِ نفسِها. والفرقُ هنا يعتمدُ على الاختلافِ في قدرةِ المادتينِ على امتصاصِ الطاقةِ. وتُستخدَمُ الحرارةُ النوعيَّةُ لمقارنةِ الاختلافِ بين الموادِّ في قدراتِها على امتصاصِ الطاقةِ. و**الحرارةُ النوعيَّةُ specific heat** ***هي كميةُ الطاقةِ اللازمةُ لرفعِ درجةِ حرارةِ جرامٍ واحدٍ من المادةِ درجةً مئويَّةً واحدةً (1°C)، أو كلفنًا واحدًا (1K)*** (وذلك لأن مقاديرَ تقسيماتِ الدرجةِ في كلا المقياسَينِ متساويةٌ). تعطى قيمُ الحرارةِ النوعيَّةِ بوحداتِ الجول/ (جرام × درجة مئويَّة)، أي J/(g•°C)، أو جول/ (جرام × كلفن)، أي J/(g•K)، أو بالكالوري/ (جرام × درجة مئويَّة)، أي cal/(g •°C). وفي الجدول 5-1 توجدُ قيمُ الحرارةِ النوعيَّةِ لبعضِ الموادِّ الشائعةِ. لاحظِ القيمةَ المرتفعةَ للحرارةِ النوعيَّةِ للماءِ، إنها الأعلى بين معظمِ الموادِّ الشائعةِ.

تقاسُ الحرارةُ النوعيَّةُ عادةً تحت ضغطٍ ثابتٍ، ورمزُها c_p، الحرفُ السفليُّ p للتذكيرِ بضرورةِ بقاءِ الضغطِ ثابتًا. وفي المعادلةِ الرياضيَّةِ التاليةِ يمثِّلُ الرمزُ c_p الحرارةَ النوعيَّةَ

الجدول 1-5 الحرارةُ النوعيَّةُ لبعضِ الموادِّ الشائعةِ عند درجةِ حرارةِ 298 K

المادة	الحرارةُ النوعية J/(g•K)
الماءُ (سائلٌ)	4.18
الماءُ (صلبٌ)	2.06
الماءُ (بخارٌ)	1.87
الأمونيا (بخارٌ)	2.09
البنزينُ (سائلٌ)	1.74
الإيثانولُ (سائلٌ)	2.44
الإيثانولُ (بخارٌ)	1.42
الألمنيومُ (صلبٌ)	0.897
الكالسيومُ (صلبٌ)	0.647
الكربونُ (صلبٌ)	0.709
النحاسُ (صلبٌ)	0.385
الذهبُ (صلبٌ)	0.129
الحديدُ (صلبٌ)	0.449
الزئبقُ (سائلٌ)	0.140
الرصاصُ (صلبٌ)	0.129

تحت ضغطٍ معيَّن، وتمثِّلُ q الطاقةَ المفقودةَ أو المكتسبةَ، كما يمثِّلُ الرمزُ m كتلةَ العيِّنةِ، و ΔT الفرقَ بين درجتَي الحرارةِ الابتدائيَّةِ والنهائيَّةِ.

$$c_p = \frac{q}{m \times \Delta T}$$

ويمكنُ إعادةُ ترتيبِ صيغةِ هذه المعادلةِ لإيجادِ كمِّيَّةِ الطاقةِ المكتسبةِ أو المفقودةِ.

$$q = c_p \times m \times \Delta T$$

مسألةٌ نموذجية 1-5

سُخِّنَ 4.0 g من الزجاجِ من 274 K إلى 314 K فامتصَّ طاقةً حراريَّةً مقدارُها 32 J.

أ. ما الحرارةُ النوعيَّةُ لهذا النوعِ من الزجاجِ؟

ب. كم يكتسبُ من الطاقةِ هذا النوعُ من الزجاجِ عند تسخينِهِ من 314 K إلى 344 K؟

الحلّ

1 حلِّل

المعطى: $m = 4.0\ \text{g}$

$\Delta T = 40.\ \text{K}$

$q = 32\ \text{J}$

المجهول: c_p بوحدة J/(g•K)

2 **خطِّطْ**

أ. تُحسَبُ قيمةُ الحرارةِ النوعيَّةِ، c_p، للزجاجِ باستخدامِ المعادلةِ التاليةِ:

$$c_p = \frac{q}{m \times \Delta T}$$

ب. تُستخدَمُ المعادلةُ التاليةُ المشتقَّةُ من المعادلةِ السابقةِ لحسابِ قيمةِ الطاقةِ المكتسبةِ عند تسخينِ الزجاجِ:

$$q = c_p \times m \times \Delta T$$

3 **احسبْ**

أ. $\frac{32\ \text{J}}{(4.0\ \text{g})(40.\ \text{K})} = 0.20\ \text{J/(g•K)}$

ب. $\frac{0.20\ \text{J}}{(\text{g•K})}(4.0\ \text{g})(344\ \text{K} - 314\ \text{K})$

$$\frac{0.20\ \text{J}}{(\text{g•K})}(4.0\ \text{g})(30\ \text{K}) = 24\ \text{J}$$

4 **قيِّمْ**

اختُصرتِ الوحداتُ بشكلٍ صحيحٍ لإعطاءِ الحرارةِ النوعيَّةِ بوحدةِ J/(g•K) وإعطاءِ الطاقةِ بوحدةِ J.

تمارينُ تطبيقيّة

1. احسبِ الحرارةَ النوعيَّةَ لمادةٍ تمتصُّ عيِّنةٌ منها كتلتُها 35 g كمّيَّةَ 48 J من الطاقةِ عند تسخينِها من 293 K إلى 313 K.

2. إذا أُضيفَ 980 kJ من الطاقةِ إلى 6.2 L من الماءِ عند درجةِ حرارة 291 K، فما درجةُ الحرارةِ النهائيَّةِ للماءِ؟ (مستعينًا بالجدول 5-1)

الجواب

1. 0.069 J/(g•K)

2. 329 K

حرارةُ التفاعلِ

تُمثِّلُ الطاقةُ الممتصةُ أو المنطلقةُ كحرارةٍ أثناءَ التفاعلِ الكيميائيِّ تحت ضغطٍ ثابتٍ بالرمزِ ΔH. حيثُ H رمزٌ لكمّيّةٍ تسمّى المحتوى الحراريَّ enthalpy. ليس عمليًّا الكلامُ عن المحتوى الحراريِّ ككمّيَّةٍ، وذلك لعدمِ وجودِ طريقةٍ لقياسِهِ في نظامٍ بصورةٍ مباشرةٍ. إنما يمكنُنا فقط قياسُ التغيُّرِ في هذا المحتوى. ويمثلُ الحرفُ الإغريقيُّ Δ (دلتا) معنى «التغيُّر في». لذلك تُقرأُ ΔH على أنها التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ. ويعرَّفُ **التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ enthalpy change** ***بأنه كمَيَّةُ الطاقةِ الممتصَّةِ أو المنطلقةِ على صورةِ حرارةٍ من قبلِ نظامٍ معيَنٍ خلالَ عمليَّةٍ تجري تحت ضغطٍ ثابتٍ.*** وتَغيُّرُ المحتوى الحراريِّ هو دائمًا الفرقُ بين المحتوى الحراريِّ للنواتجِ والمحتوى الحراريِّ للمتفاعلاتِ، ويُعبَّرُ عنه بالمعادلةِ التاليةِ:

$$\Delta H = H_{\text{النواتج}} - H_{\text{المتفاعلات}}$$

حرارةُ التفاعلِ heat of reaction ***هي كمَيَّةُ الطاقةِ المنتقلةِ (الممتصةِ أو المنطلقةِ) كحرارةٍ أثناءَ التفاعلِ الكيميائيِّ.*** ويمكنُ تصوُّرُ حرارةِ التفاعلِ كحاصلِ الفرقِ بين طاقةِ المتفاعلاتِ والنواتجِ المخزونةِ.

إذا أُشعِلَ خليطٌ من الهيدروجينِ والأكسجينِ يتكوَّنُ ماءٌ، وتنطلقُ طاقةٌ مصحوبةٌ بانفجارٍ. ومصدرُ الطاقةِ المنطلقةِ هو المتفاعلاتُ عند تكوينِها للنواتج. ولأن الطاقةَ انطلقتْ من التفاعلِ يسمّى التفاعلُ طاردًا للحرارةِ exothermic، وفيه تكونُ طاقةُ الناتجِ (الماء) أقلَّ من طاقةِ المتفاعلاتِ. وتشيرُ المعادلةُ الكيميائيَّةُ لهذا التفاعلِ إلى أنه لدى احتراقِ 2 mol من غازِ الهيدروجينِ، عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ، يُستهلكُ 1 mol من غازِ الأكسجينِ وينتجُ 2 mol من بخارِ الماءِ.

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g)$$

لا تخبرُكَ هذه المعادلةُ عن الطاقةِ المنطلقةِ على صورةِ حرارةٍ خلال التفاعل. لقد أظهرتِ التجاربُ أن 483.6 kJ من الطاقةِ تنطلقُ عند تكوُّنِ 2 mol من بخارِ الماءِ من عناصرِه عند درجةِ حرارةِ 298 K.

تعبِّرُ المعادلةُ التاليةُ عن كمِّيَّةِ الطاقةِ المنطلقةِ خلالَ التفاعل.

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g) + 483.6 \text{ kJ}$$

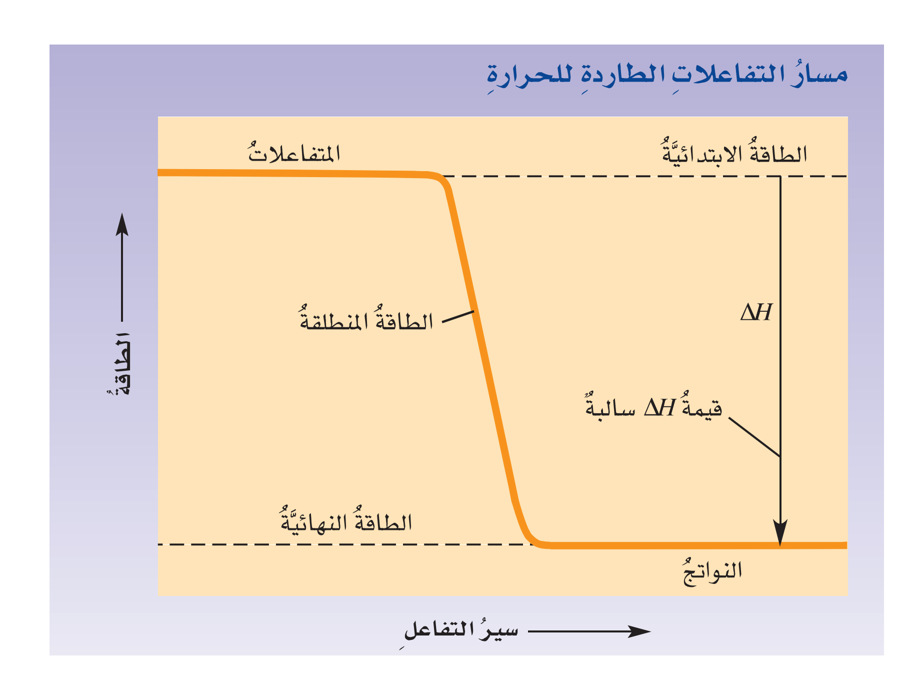
وهذه المعادلةُ تسمّى **المعادلةَ الكيميائيَّةَ الحراريَّةَ thermochemical equation** ***وهي المعادلةُ التي تتضمَّنُ كمّيَّةَ الطاقةِ الممتصَّةِ أو المنطلقةِ كحرارةٍ خلالَ التفاعلِ الكيميائيِّ.*** وفي أيِّ معادلةٍ من هذا النوعِ يلزمُ دائمًا أن نعرِّفَ المعاملاتِ كعددِ مولاتٍ وليس كعددِ جزيئاتٍ. إن كمّيَّةَ الطاقةِ المنطلقةِ على صورةِ حرارةٍ في هذا التفاعلِ، أو في أيِّ تفاعلٍ كيميائيٍّ آخرَ، تعتمدُ على كمّيَّةِ المتفاعلاتِ والنواتجِ. وإن كمّيَّةَ الطاقةِ المنطلقةِ خلال تكوُّنِ الماءِ من H_2 و O_2 تتناسبُ طرديًّا مع كمّيَّةِ الماءِ المتكوِّنةِ. إن إنتاجَ 4 mol من بخارِ الماءِ، أي ضعفَ الكمّيَّةِ المنتجةِ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ السابقةِ، يتطلَّبُ ضعفَ عددِ مولاتِ المتفاعلاتِ، وسينطلق من التفاعل 483.6 kJ × 2 من الطاقةِ كحرارةٍ، كما هو مبيَّنٌ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ التاليةِ (وهي ببساطةٍ المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ السابقةُ مضروبةً بـ 2).

$$4H_2(g) + 2O_2(g) \rightarrow 4H_2O(g) + 967.2 \text{ kJ}$$

أما إنتاج نصفِ كميَّةِ بخارِ الماءِ فتحتاجُ إلى نصفِ عددِ مولاتِ المتفاعلاتِ، وسينطلقُ نصفُ كمّيَّةِ الطاقةِ أي $483.6 \text{ kJ} \times \frac{1}{2}$، وتكونُ المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ لهذا التفاعلِ كالتالي:

$$H_2(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow H_2O(g) + 241.8 \text{ kJ}$$

وأما في التفاعلاتِ الماصَّةِ للحرارةِ endothermic فالحالةُ معكوسةٌ تمامًا، لأن طاقةَ النواتجِ تكونُ أكبرَ من طاقةِ المتفاعلاتِ. إن تفاعلَ تفكُّكِ بخارِ الماءِ هو تفاعلٌ ماصٌّ للحرارةِ، وهو معكوسُ تفاعلِ تكوينِ بخارِ الماءِ. إن كمّيَّةَ الطاقةِ الممتصَّةِ من جزيئاتِ الماءِ لتكوينِ الهيدروجينِ والأكسجينِ تساوي كمّيَّةَ الطاقةِ المنطلقةِ لدى اتحادِ هذيْنِ العنصرَين في عمليَّةِ تكوينِ الماءِ. وهذا الأمرُ متوقَّعٌ، لأن الفرقَ بين طاقةِ المتفاعلاتِ والنواتجِ لم يتغيَّرْ. وفي المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ التاليةِ تظهرُ الطاقةُ في جانبِ المتفاعلاتِ على أنها قد امتُصَّتْ خلال التفاعلِ وليس العكسُ، كما رأينا في التفاعلاتِ الطاردةِ للحرارةِ.



الشكل 2-5 في التفاعلِ الكيميائيِّ الطاردِ للحرارةِ يكونُ التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ سالبًا، وهذا يعني أن الطاقةَ تنطلقُ من النظامِ على شكلِ حرارةٍ.

$$2H_2O(g) + 483.6\ kJ \rightarrow 2H_2(g) + O_2(g)$$

في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ يجبُ ذكرُ الحالةِ الفيزيائيَّةِ للمتفاعلاتِ والنواتجِ دائمًا، لأنها تؤثِّرُ في مجمل كمِّيَّةِ الطاقةِ المتبادلةِ. على سبيلِ المثالِ، تكونُ الطاقةُ اللازمةُ لتفكُّكِ الماءِ أكبرَ من 483.6 kJ إذا ابتدأنا باستخدامِ الثلجِ، إذ يلزمُ طاقةٌ إضافيَّةٌ لصهرِ الثلجِ وتحويلِ السائلِ إلى بخارٍ.

تكتبُ المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ عادةً بتحديدِ قيمةِ ΔH بدلاً من كتابةِ الطاقةِ كمتفاعلٍ أو ناتجٍ. في التفاعلاتِ الطاردةِ للحرارةِ تكونُ ΔH سالبةً دائمًا لأن النظامَ يفقدُ طاقةً أثناءَ التفاعلِ. وبذلك تصبحُ المعادلةُ المعبِّرةُ عن التفاعلِ الطاردِ للحرارةِ، في حالةِ تكوُّنِ 2 mol من بخارِ الماءِ من عنصرَيهِ H_2 و O_2، كالتالي:

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(g) \qquad \Delta H = -483.6\ kJ$$

الشكلُ 5-2 يُظهرُ تخطيطًا يبيِّنُ سيرَ التفاعلِ الطاردِ للحرارةِ. الطاقةُ الابتدائيَّةُ للمتفاعلاتِ أكبرُ من الطاقةِ النهائيَّةِ للنواتجِ. وهذا يعني أن الطاقةَ قد انطلقتْ خلالَ التفاعلِ، وفي هذه الحالةِ تكونُ قيمةُ ΔH سالبةً.

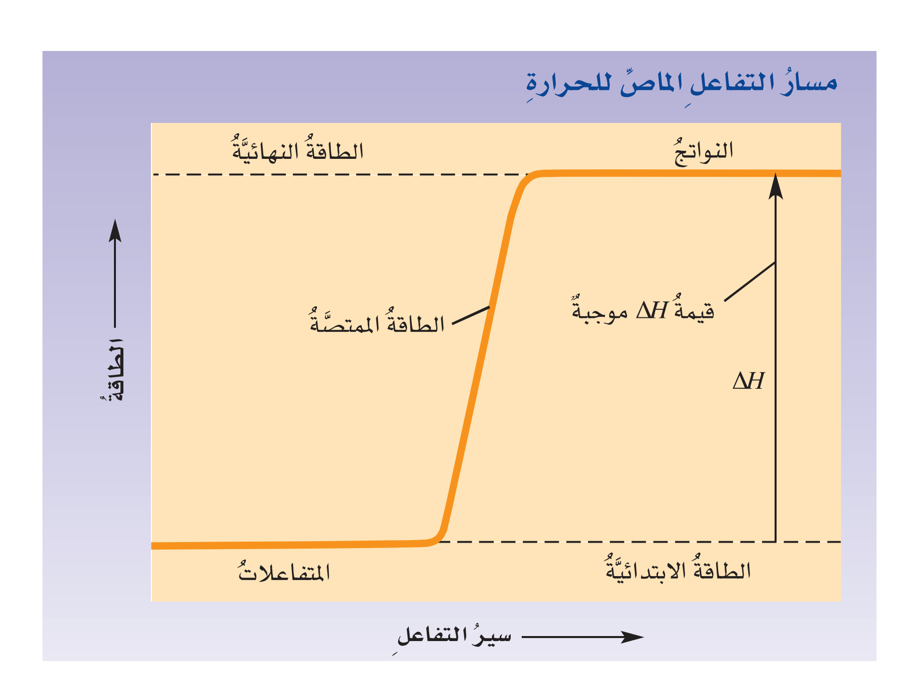
وفي التفاعلاتِ الماصةِ للحرارةِ، تكونُ ΔH موجبةً دائمًا، لأن النظامَ يكتسبُ طاقةً. ولهذا، تصبحُ المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ التاليةُ المعبِّرةُ عن تفكُّكِ 2 mol من بخارِ الماءِ:

$$2H_2O(g) \rightarrow 2H_2(g) + O_2(g) \qquad \Delta H = +483.6\ kJ$$

ويوضحُ الشكلُ 5-3 مسارَ هذا التفاعلِ الماصِّ للحرارةِ. وامتصاصُ الطاقةِ في هذا التفاعلِ يعني أن الطاقةَ الابتدائيَّةَ للمتفاعلاتِ تكونُ أقلَّ من الطاقةِ النهائيَّةِ للنواتجِ. وتكونُ في هذه الحالةِ ΔH موجبةً.

لدى استخدامِكَ المعادلاتِ الكيميائيَّةَ الحراريَّةَ تذكَّرْ أن:

1. المعاملاتِ في المعادلاتِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ الموزونةِ تمثِّلُ عددَ مولاتِ المتفاعلاتِ والنواتجِ فقط، ولا تمثِّلُ عددَ الجزيئاتِ مطلقًا. لذلك يمكنُ عند الحاجةِ كتابةُ هذه المعاملاتِ ككسورٍ وليس بالضرورةِ أعدادًا صحيحةً.



الشكل 3-5 في التفاعلِ الكيميائيِّ الماصِّ للحرارةِ يكونُ التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ موجبًا، لأن النظامَ يمتصُّ الطاقةَ كحرارةٍ.

2. الحالةَ الفيزيائيَّةَ للمتفاعلِ أو الناتجِ عاملٌ مهمٌّ يجبُ ذكرُهُ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ.

3. التغيُّرَ في الطاقةِ الممثَّلَ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ يتناسبُ طرديًّا مع عددِ مولاتِ الموادِّ الخاضعةِ للتغيُّرِ. فعلى سبيلِ المثالِ، لدى تفكُّكِ 2 mol من الماءِ نحتاجُ إلى ضعفِ الطاقةِ اللازمةِ (483.6 kJ) لتفكُّكِ 1 mol منهُ.

4. قيمةَ تغيُّرِ الطاقةِ ΔH لا تتأثَّرُ عادةً بتغيُّرِ درجةِ الحرارةِ.

حرارةُ التكوينِ

إن تحضيرَ الماءِ من الهيدروجينِ والأكسجينِ هو تفاعلُ تكوينٍ، وهو التفاعلُ الذي تتكوَّنُ فيه المركَّباتُ من عناصرِها في حالتِها القياسيَّةِ. ما تسجِّلُهُ بياناتُ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ هو غالبًا بياناتُ حرارةِ تفاعلاتِ التكوينِ هذه. تُعرفُ **حرارةُ التكوينِ الموليةُ molar heat of formation** ***بتغيُّرِ الحرارةِ الذي يحصلُ لدى تكوُّنِ مولٍ واحدٍ من مركَّبٍ من عناصرِه في حالتِها القياسيَّةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C وضغطِ 1 atm.***

ولجعلِ المقارنةِ مجديةً أكثرَ حُسِبَتْ حرارةُ التكوينِ في الحالاتِ القياسيَّةِ للمتفاعلاتِ والنواتجِ، أي تحت ضغطٍ جويٍّ واحدٍ (1 atm)، وعادةً عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ (298 K). لذلك، فالحالةُ القياسيَّةُ للماءِ هي حالةُ السيولةِ، لا الحالةُ الصلبةُ ولا الغازيَّةُ. والحالةُ القياسيَّةُ للحديدِ هي الحالةُ الصلبةُ وليس السائلةُ. ولتعزيزِ مفهومِ أن القيمةَ تمثِّلُ قياساتٍ تُجرى على الموادِّ في حالاتِها القياسيَّةِ، يضافُ الرمزُ ^{0} إلى رمزِ حرارةِ التفاعلِ، فيعطي ΔH^0 معنى حرارةِ التكوينِ القياسيَّةِ. إن إضافةَ الحرفِ السفليِّ f، الحرفِ الأولِ من كلمةِ formation، كما في ΔH_f^0، يعني حرارةَ التكوينِ القياسيَّةِ.

وفي ملحق الجدول (أ-5) أُعطيتْ بعضُ قيم حرارةِ التكوينِ القياسيَّةِ. وتمثِّلُ كلُّ قيمةٍ في الجدولِ حرارةَ التكوينِ اللازمةَ لتكوينِ 1 mol من كلِّ مركَّبٍ مدرجٍ، من عناصره الأوليَّةِ في الحالاتِ القياسيَّةِ.

استقرارُ المركَّباتِ وحرارةُ تكوينِها

إذا انطلقتْ كمّيَّةٌ كبيرةٌ من الطاقةِ لدى تكوينِ مركَّبٍ، فإن حرارةَ تكوينِ هذا المركَّبِ لها قيمةٌ سالبةٌ كبيرةٌ. وبذلك يكونُ المركَّبُ مستقرًّا جدًّا.

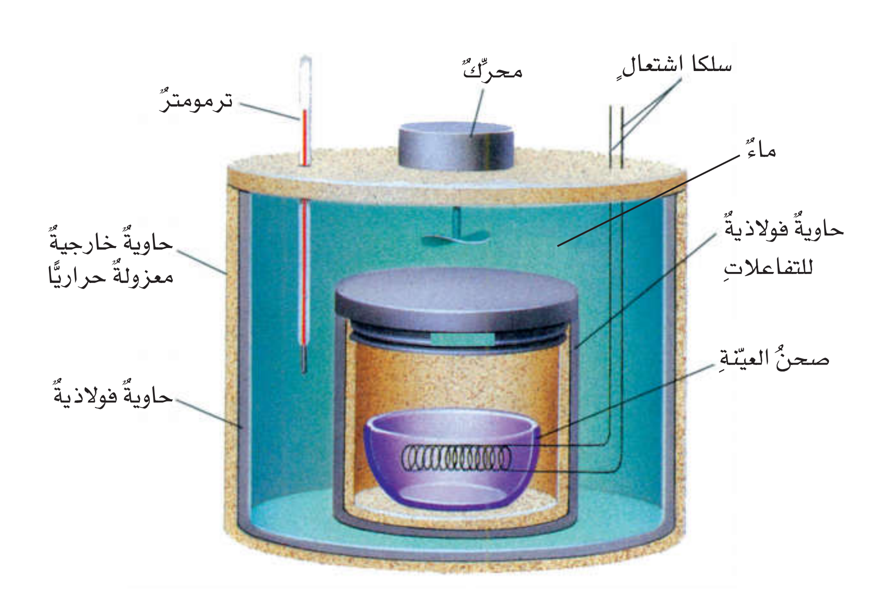
وتعرفُ العناصرُ في حالتِها القياسيَّةِ على أنها تمتلكُ $\Delta H_f^0 = 0$. وقيمةُ ΔH_f^0 لثنائي أكسيدِ الكربونِ هي (393.5 kJ/mol−). لذلك فإن ثنائيَ أكسيدِ الكربونِ أكثرُ استقرارًا من العناصرِ التي تكوَّنَ منها أصلاً. ويمكنُكَ الاطلاعُ على ملحقِ الجدولِ أ-5 لترى أن غالبيَّةَ قيمِ حرارةِ التكوينِ تكونُ سالبةً.

المركَّباتُ، ذاتُ القيمِ الموجبةِ لحرارةِ التكوينِ أو ذاتُ القيمِ السالبةِ القليلةِ، هي في الواقعِ غيرُ مستقرَّةٍ. على سبيلِ المثالِ، غازُ يوديدِ الهيدروجينِ HI لا لونَ لهُ، ويتفكَّكُ أحيانًا عند تخزينِهِ عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ. فقيمةُ حرارةِ التكوينِ لهذا الغازِ عاليةٌ نسبيًّا، إذ تبلغُ 26.5 kJ/mol+. وعند تفكُّكِهِ يتكوَّنُ بخارُ اليود I_2 البنفسجيُّ، ويصبحُ مرئيًّا على جوانبِ وعاءِ الغازِ كلِّها.

أما المركَّباتُ التي لها حرارةُ تكوينٍ موجبةٌ وعاليةٌ فتكون غيرَ مستقرَّةٍ تمامًا، وقد تتفاعلُ أو تتفكَّك بشدةٍ. فعلى سبيلِ المثالِ، إن الإيثاين (أسيتيلين) C_2H_2، ($\Delta H_f^0 = +226.7$ kJ/mol)، يتفاعلُ بقوَّةٍ مع الأكسجينِ، ويجبُ تخزينُهُ في أسطواناتٍ محلولاً في الأسيتونِ. وفلميناتُ الزئبقِ، $HgC_2N_2O_2$، له حرارةُ تكوينٍ عاليةٌ جدًّا (+270 kJ/mol)، ولكونهِ غيرَ مستقرٍّ تمامًا فإنهُ يُستخدَمُ كصاعقٍ للمتفجِّراتِ.

حرارةُ الاحتراقِ

تُنتِجُ تفاعلاتُ الاحتراقِ كمّيَّةً كبيرةً من الطاقةِ على صورةِ ضوءٍ وحرارةٍ عند اتحادِ المادّةِ مع الأكسجينِ. ***والحرارةُ المنطلقةُ لدى الاحتراقِ الكاملِ لمولٍ واحدٍ من المادةِ تسمَّى حرارةَ الاحتراقِ heat of combustion للمادَّةِ.*** تُعرَّفُ حرارةُ الاحتراقِ بدلالةِ مولٍ واحدٍ من المتفاعلِ، فيما تُعرَّفُ حرارةُ التكوينِ بدلالةِ مولٍ واحدٍ من الناتجِ. وجميعُ الموادِّ تكونُ في حالتِها القياسيَّةِ. ويستخدَمُ الترميزُ العامُّ ΔH في التعبيرِ عن حرارةِ التفاعلِ. وعند إضافةِ الرمزِ السفليِّ c (الحرفُ الأوّلُ من كلمة combustion) تشيرُ ΔH_c إلى حرارةِ الاحتراقِ. ويمكنُكَ الاطِّلاعُ على قائمةٍ من قيمِ حرارةِ الاحتراقِ في ملحقِ الجدولِ (أ-1). ويُعدُّ كالوريمترُ الاحتراقِ الجهازَ الشائعَ لتحديدِ قيمِ حرارةِ الاحتراقِ، كما في الشكلِ 5-4.



الشكل 4-5 كالوريمترُ احتراقٍ بسيطٌ: عيِّنةٌ ذاتُ كتلةٍ معروفةٍ تمَّ إشعالُها بواسطةِ شحنةٍ كهربائيَّةٍ لتحترقَ في صحنِ العيِّنةِ في جوٍّ من الأكسجينِ النقيِّ. تعملُ الطاقةُ المتولِّدةُ من تفاعلِ الاحتراقِ على تسخينِ الحاويةِ الفولاذيَّةِ والماءِ المحيطِ بها. يقيسُ الترمومترُ درجتَيْ حرارةِ الماءِ الابتدائيَّةِ والنهائيَّةِ. ويستخدَمُ التغيُّرُ في درجةِ الحرارةِ لحسابِ كمّيَّةِ الطاقةِ التي يطلقُها التفاعلُ كحرارةٍ.

حسابُ حرارةِ التفاعلِ

يمكنُ إعادةُ ترتيبِ المعادلاتِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ وجمعُها لكي تعطيَ تغيُّراتٍ في قيمِ حرارةِ التفاعلِ غيرِ الواردةِ في جداولِ البياناتِ. ويعرَّفُ الأساسُ في حسابِ حرارةِ التفاعلِ بقانونِ هسّ **Hess's law** ***الذي ينصُّ على أن التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ ΔH لأيِّ تفاعلٍ كيميائيٍّ قيمتُهُ ثابتةٌ، سواءٌ تمَّ هذا التفاعلُ في خطوةٍ واحدةٍ أو في عدَّةِ خطواتٍ.*** وهذا يعني أن التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ الإجماليَّ في التفاعلِ هو حاصلُ جمعِ التغيُّراتِ في المحتوى الحراريِّ للخطواتِ الفرديَّةِ في عمليَّةِ التفاعلِ. إن فرقَ الطاقةِ بين المتفاعلاتِ والنواتجِ مستقلٌّ تمامًا عن المسارِ الذي يسلكُهُ التفاعلُ للحصولِ على الواحدِ من الآخرِ. وفي الحقيقةِ، يمكنُ جمعُ قيمِ ΔH المقيسةِ للتفاعلاتِ لحسابِ حرارةِ التفاعلِ التي يصعبُ أو يستحيلُ قياسُها في الواقعِ.

ولتوضيحِ كيفيَّةِ تطبيقِ قانونِ هسّ نحسبُ حرارةَ تكوينِ غازِ الميثانِ CH_4، من عنصرَيْهِ غازِ الهيدروجينِ والكربونِ الصلبِ (الجرافيت) عند درجةِ حرارةِ 298 K (25°C).

$$C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g) \qquad \Delta H_f^0 = ?$$

لأجلِ حسابِ حرارةِ هذا التفاعلِ يمكنُنا أن نستخدمَ تفاعلَ الاحتراقِ لعناصرِ الكربونِ والهيدروجينِ والميثانِ.

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_c^0 = -393.5 \text{ kJ}$$

$$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l) \qquad \Delta H_c^0 = -285.8 \text{ kJ}$$

$$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(l) \qquad \Delta H_c^0 = -890.8 \text{ kJ}$$

تتبعُ المبادئُ العامَّةُ لجمعِ المعادلاتِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ ما يلي:

1. إذا انعكسَ التفاعلُ تنعكسُ إشارةُ ΔH هي الأخرى.

2. تُضربُ معاملاتُ المعادلاتِ المعروفةِ بأعدادٍ بسيطةٍ بحيثُ تعطي، لدى جمعِها، المعادلةَ الكيميائيَّةَ الحراريَّةَ المطلوبةَ. وتُضربُ ΔH في العددِ نفسِه الذي ضُرِبت فيه المعادلةُ نفسُها.

في هذه الحالةِ تُعكَسُ معادلةُ احتراقِ الميثانِ. ولا تنسَ أن تُغيِّرَ إشارةَ ΔH من السالبِ إلى الموجبِ. وسيُغيِّرُ هذا التفاعلُ من تفاعلٍ طاردٍ للحرارةِ إلى تفاعلٍ ماصٍّ للحرارةِ.

$$CO_2(g) + 2H_2O(l) \rightarrow CH_4(g) + 2O_2(g) \qquad \Delta H^0 = +890.8\ kJ$$

من الملاحظِ هنا أن 2 mol من الماءِ استخدمتْ كمادّةٍ متفاعلةٍ، لذلك سنحتاجُ إلى 2 mol من الماءِ كمادَّةٍ ناتجةٍ. فتفاعلُ احتراقِ الهيدروجينِ كما تمَّتْ كتابتُهُ، يُنتِجُ مولاً واحدًا من الماءِ. وعلينا ضربُ المعاملاتِ في تفاعلِ الاحتراقِ هذا وقيمةِ ΔH في 2، للحصولِ على 2 mol من الماءِ.

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l) \qquad \Delta H_c^0 = 2(-285.8\ kJ)$$

والآنَ أصبحْنا جاهزينَ لجمعِ المعادلاتِ الثلاثِ معًا مستخدمينَ قانونَ هسْ، وذلك لإعطاءِ قيمةِ حرارةِ تكوينِ الميثانِ والمعادلةِ الموزونةِ.

$$C(s) + \cancel{O_2(g)} \rightarrow \cancel{CO_2(g)} \qquad \Delta H_c^0 = -393.5\ kJ$$

$$2H_2(g) + \cancel{O_2(g)} \rightarrow \cancel{2H_2O(l)} \qquad \Delta H_c^0 = 2(-285.8\ kJ)$$

$$\cancel{CO_2(g)} + \cancel{2H_2O(l)} \rightarrow CH_4(g) + \cancel{2O_2(g)} \qquad \Delta H^0 = +890.8\ kJ$$

$$\overline{C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g) \qquad \Delta H_f^0 = -74.3\ kJ}$$

ينصُّ قانونُ هسْ على أن التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ (ΔH) بين المتفاعلاتِ والنواتجِ مستقلٌّ تمامًا عن مسارِ التفاعلِ. وبذلك يمكنُ حسابُ حرارةِ التفاعلِ باستخدامِ حرارةِ التكوينِ لجميعِ الموادِّ في التفاعلِ المطلوبِ، ودون معرفةِ أيِّ شيءٍ آخرَ حول كيفيَّةِ حدوثِ التفاعلِ. ومن الناحيةِ الرياضيَّةِ، تكونُ المعادلةُ العامةُ لحسابِ ΔH بشكلِ المعادلةِ التاليةِ:

$$\Delta H^0 = \text{مجموع } \Delta H_f^0 \text{ النواتج} - \text{مجموع } \Delta H_f^0 \text{ المتفاعلات}$$

وعند حسابِ قيمِ ΔH لكلٍّ من النواتجِ والمتفاعلاتِ يتمُّ ضربُ قيمِ حرارةِ التكوينِ لكلٍّ منها في عددِ مولاتِهِ في المعادلةِ الموزونةِ.

المسألة النموذجيَّةُ 5-2 تبيِّنُ مثالاً يستخدِمُ قانونَ هس.

مسألةٌ نموذجية 5-2

احسبْ حرارةَ التفاعلِ لاحتراقِ غازِ أحادي أكسيدِ النيتروجينِ NO، لتكوينِ غازِ ثنائي أكسيدِ النيتروجينِ NO_2، كما في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ التاليةِ:

$$NO(g) + \tfrac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO_2(g)$$

واستخدمِ المعادلتَينِ الكيميائيَّتَينِ التاليتينِ:

$$\tfrac{1}{2}N_2(g) + \tfrac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO(g) \qquad \Delta H_f^0 = +90.29\ kJ$$

$$\tfrac{1}{2}N_2(g) + O_2(g) \rightarrow NO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = +33.2\ kJ$$

الحلّ

1 حلّل

المعطى:
$$\frac{1}{2}N_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO(g) \qquad \Delta H_f^0 = +90.29\ kJ$$
$$\frac{1}{2}N_2(g) + O_2(g) \rightarrow NO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = +33.2\ kJ$$

المجهول: ΔH^0 لـ $NO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO_2(g)$

2 خطّطْ

يمكنُ إيجادُ قيمةِ ΔH بجمعِ قيمِ ΔH للتفاعلاتِ المكوِّنةِ للمعادلةِ المطلوبةِ كما ينصُّ قانونِ هسّ، وسيكونُ للمعادلةِ المطلوبةِ متفاعلانِ $NO(g)$ و $\frac{1}{2}O_2(g)$ وناتجٌ هو $NO_2(g)$.

$$NO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO_2(g)$$

وهنا نحتاجُ إلى معادلةٍ يكونُ فيها NO متفاعلاً. ويؤدّي عكسُ التفاعلِ الأوّلِ المكوِّنِ لـ NO من عنصرَيْهِ وعكسُ إشارةِ ΔH إلى المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ التاليةِ:

$$NO(g) \rightarrow \frac{1}{2}N_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \qquad \Delta H^0 = -90.29\ kJ$$

ويجبُ أن تحتويَ المعادلةُ الأخرى NO_2 كناتجٍ، وبذلك يمكنُنا المحافظةُ على المعادلةِ الثانيةِ المكوِّنةِ لـ NO_2 من عناصرِهِ كما هي دون تغييرٍ.

$$\frac{1}{2}N_2(g) + O_2(g) \rightarrow NO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = +33.2\ kJ$$

3 احسبْ

$$NO(g) \rightarrow \cancel{\frac{1}{2}N_2(g)} + \cancel{\frac{1}{2}O_2(g)} \qquad \Delta H^0 = -90.29\ kJ$$
$$\cancel{\frac{1}{2}N_2(g)} + O_2(g) \rightarrow NO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = +33.2\ kJ$$

$$NO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO_2(g) \qquad \Delta H^0 = -57.1\ kJ$$

4 قيِّمْ

اختُصِرتِ المتفاعلاتُ والنواتجُ غيرُ الضروريَّةِ لإعطاءِ المعادلةِ المطلوبةِ.

مسألةٌ نموذجية 3-5

احسبْ حرارةَ التفاعلِ لاحتراقِ غازِ أحادي أكسيدِ النيتروجينِ NO، لتكوينِ غازِ ثنائي أكسيدِ النيتروجينِ NO_2، كما في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ التاليةِ:

$$NO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO_2(g)$$

استخدمْ بياناتِ حرارةِ التكوينِ في ملحقِ الجدولِ (أ-5).

الحلّ

1 حلّل

المعطى:
$$\Delta H_f^0\ (NO) = +90.29\ kJ/mol$$
$$\Delta H_f^0\ (NO_2) = +33.2\ kJ/mol$$
$$\Delta H_f^0\ (O_2) = 0\ kJ/mol$$

المجهول: ΔH^0 للتفاعل $NO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow NO_2(g)$

2 **خطّطْ**

يمكنُ استخدامُ العلاقةِ

$$\Delta H^0 = \text{مجموع } \Delta H_f^0 \text{ النواتج} - \text{مجموع } \Delta H_f^0 \text{ المتفاعلات}$$

3 **احسبْ**

$$\Delta H^0 = \Delta H_f^0(NO_2) - [\Delta H_f^0(NO) + 0]$$

$$= +33.2 \text{ kJ/mol} - 90.29 \text{ kJ/mol} = -57.1 \text{ kJ}$$

4 **قيّمْ**

من خلال ملاحظةِ قيمةِ ΔH^0 للتفاعلِ في المسألةِ النموذجيَّةِ 5-2 وُجِدَ أنها تتطابقُ تمامًا مع قيمةِ ΔH^0 المحسوبةِ في هذه المسألةِ.

تمارينُ تطبيقية

.1 احسبْ حرارةَ تفاعلِ احتراقِ غازِ الميثانِ CH_4 لتكوينِ $CO_2(g) + H_2O(l)$.

.2 يتواجدُ الكربونُ بشكلَينِ مختلفَينِ. فهو يمكنُ أن يكونَ مادَّةً ناعمةً سوداءَ معبّأةً في أقلامِ الرصاصِ، ومادَّةً لتشحيمِ الأقفالِ تسمّى الجرافيتَ، أو مادَّةً صلبةً برّاقةً تسمّى الماس. احسبْ ΔH^0 لعمليَّةِ تحويلِ الجرافيتِ إلى ماسٍ في التفاعلِ التالي:

$$C_{\text{جرافيت}}(s) \rightarrow C_{\text{ماس}}(s)$$

تفاعلاتُ الاحتراقِ التي تحتاجُ إليها هي:

$$C_{\text{جرافيت}}(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_c^0 = -394 \text{ kJ}$$

$$C_{\text{ماس}}(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_c^0 = -396 \text{ kJ}$$

الجواب

.1 -890.2 kJ

.2 2 kJ

حسابُ حرارةِ التكوينِ

عندما يشتعلُ الكربونُ في كمّيَّةٍ محدودةٍ من الأكسجين، ينتجُ أحادي أكسيدِ الكربونِ. في هذا التفاعلِ يتأكسدُ الكربونُ أوّلاً ليعطيَ ثنائيَ أكسيدِ الكربونِ. ومن ثمَّ يُختزَلُ جزءٌ من ثنائي أكسيدِ الكربونِ بواسطةِ الكربون ليعطيَ أحادي أكسيدِ الكربونِ. وبما أن هذينِ التفاعلَينِ يجريانِ في الوقتِ نفسِهِ لنحصلَ على مزيجٍ من CO و CO_2، فإنه من الصعبِ قياسُ حرارةِ تكوينِ CO(g) من C(s) و $O_2(g)$ بصورةٍ مباشرةٍ.

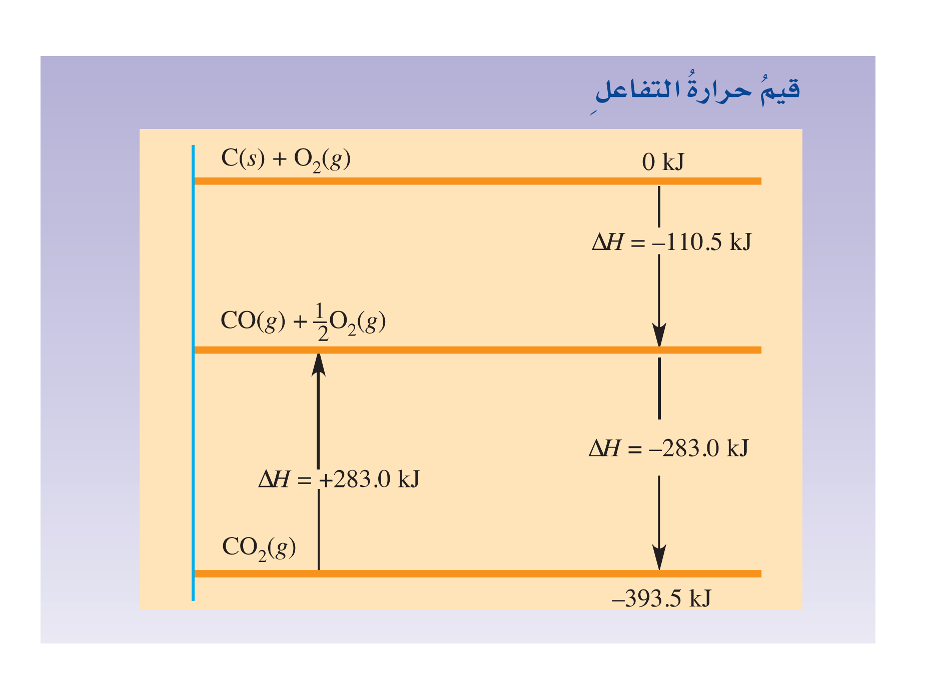
$$C(s) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO(g) \qquad \Delta H_f^0 = ?$$

من ناحيةٍ أخرى، نحن نعرفُ حرارةَ تكوينِ CO_2 وحرارةَ احتراقِ CO.

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = -393.5 \text{ kJ/mol}$$

$$CO(g) + \frac{1}{2} O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_c^0 = -283.0 \text{ kJ/mol}$$

بعدئذٍ، نقومُ بعكسِ المعادلةِ الثانيةِ لحاجتِنا إلى CO كناتجٍ. وجمعُ المعادلاتِ يعطي حرارةَ التكوينِ المطلوبةَ لأحادي أكسيدِ الكربونِ.



الشكل 5-5 يظهرُ الشكلُ البيانيُّ حرارةَ التفاعلِ لثنائي أكسيدِ الكربونِ CO_2 وأحادي أكسيدِ الكربونِ CO.

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H^0 = -393.5\ kJ$$

$$CO_2(g) \rightarrow CO(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \qquad \Delta H^0 = +283.0\ kJ$$

$$C(s) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow CO(g) \qquad \Delta H^0 = -110.5\ kJ$$

مسألةٌ نموذجية 4-5

احسبْ حرارةَ تكوينِ البنتان C_5H_{12}، موظّفًا المعادلاتِ الكيميائيَّةَ الحراريَّةَ التاليةَ:

$$\mathbf{C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = -393.5\ kJ}$$

$$\mathbf{H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l) \qquad \Delta H_f^0 = -285.8\ kJ}$$

$$\mathbf{C_5H_{12}(g) + 8O_2(g) \rightarrow 5CO_2(g) + 6H_2O(l) \qquad \Delta H_c^0 = -3535.6\ kJ}$$

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى:

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H_f^0 = -393.5\ kJ$$

$$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l) \qquad \Delta H_f^0 = -285.8\ kJ$$

$$C_5H_{12}(g) + 8O_2(g) \rightarrow 5CO_2(g) + 6H_2O(l) \qquad \Delta H_c^0 = -3535.6\ kJ$$

المجهول: ΔH_f^0 لـ $5C(s) + 6H_2(g) \rightarrow C_5H_{12}(g)$

2 خطِّطْ

جمّعِ المعادلاتِ المعطاةَ وفقًا لقانونِ هسّ. نحتاجُ إلى C_5H_{12} كناتجٍ، لذا نعكسُ معادلةَ احتراقِ C_5H_{12} وإشارةَ ΔH_c^0. اضربْ معادلةَ تكوينِ CO_2 في 5 لتعطيَ $5C$ كمتفاعلٍ. اضربْ معادلةَ تكوينِ H_2O في 6 لتعطيَ $6H_2$ كمتفاعلٍ.

3 **احسبْ**

$$5C(s) + 5O_2(g) \rightarrow 5CO_2(g) \quad \Delta H^0 = 5(-393.5\ kJ)$$
$$6H_2(g) + 3O_2(g) \rightarrow 6H_2O(l) \quad \Delta H^0 = 6(-285.8\ kJ)$$
$$5CO_2(g) + 6H_2O(l) \rightarrow C_5H_{12}(g) + 8O_2(g) \quad \Delta H_f^0 = +3535.6\ kJ$$

$$5C(s) + 6H_2(g) \rightarrow C_5H_{12}(g) \quad \Delta H_f^0 = -145.7\ kJ$$

4 **قيِّمْ** تمَّ اختصارُ المتفاعلاتِ والنواتجِ غيرِ الضروريَّةِ لإعطاءِ المعادلةِ المطلوبةِ فقط والمعبِّرةِ عن تكوينِ البنتانِ.

تمارينُ تطبيقية

1. موظِّفًا البياناتِ الواردةَ في ملحقِ الجدولِ (أ-1) وفي ملحقِ الجدولِ (أ-5)، اكتبِ المعادلةَ الكيميائيَّةَ الحراريَّةَ المعبِّرةَ عن احتراقِ غازِ البيوتانِ C_4H_{10}، ثم احسبْ قيمةَ حرارةِ التكوينِ لغازِ البيوتانِ.
2. احسبْ حرارةَ احتراقِ 1 mol من النيتروجينِ N_2 لتكوينِ NO_2 مستخدمًا المعادلةَ الكيميائيَّةَ الموزونةَ وملحقَ الجدولِ (أ-5).
3. احسبْ حرارةَ تكوينِ ثنائي أكسيدِ الكبريتِ SO_2، من عنصريَهِ، الكبريتِ والأكسجينِ، مستخدمًا المعادلةَ الكيميائيَّةَ الموزونةَ والمعلوماتِ التاليةِ:

$$S(s) + \frac{3}{2}O_2(g) \rightarrow SO_3(g) \quad \Delta H_c^0 = -395.2\ kJ$$
$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2SO_3(g) \quad \Delta H^0 = -198.2\ kJ$$

الجواب
1. -125.4 kJ
2. $+66.4$ kJ
3. -296.1 kJ

مراجعةُ القسم 1-5

1. ما المقصودُ بتغيُّرِ المحتوى الحراريِّ؟
2. ما المقصودُ بحرارةِ التفاعلِ؟
3. فسِّرِ العلاقةَ بين استقرارِ المركَّبِ وحرارةِ تكوينِه.
4. ما أهمّيَّةُ قانونِ هسّ في حساباتِ الكيمياءِ الحراريَّةِ؟
5. ما كمّيَّةُ الطاقةِ الممتصَّةِ كحرارةٍ من 75 g حديدًا عند تسخينِها من 295 K إلى 301 K؟

تفكيرٌ ناقدٌ

6. **تكاملُ مفاهيمَ:** الإيزوأوكتانُ C_8H_{18} هو المكوِّنُ الأكبرُ للجازولينِ.

أ. مستخدمًا البياناتِ التاليةَ، احسبْ حرارةَ احتراقِ 1 mol من الإيزوأوكتانِ.

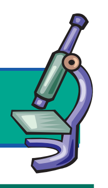
البياناتُ:

$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g)$، $\Delta H^0 = -241.8\ kJ$

$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$، $\Delta H^0 = -393.5\ kJ$

$8C(s) + 9H_2(g) \rightarrow C_8H_{18}(l)$، $\Delta H^0 = -224.13\ kJ$

ب. كتلةُ الجالونِ الواحدِ من الإيزوأوكتانِ 2.6 kg. احسبْ ΔH لاحتراقِ جالونٍ واحدٍ من هذه المادَّةِ؟



قراءةٌ علميَّةٌ

الوجباتُ ذاتيَّةُ التسخينِ

من كان يتصوّرُ أن التآكلَ مفيدٌ؟ لقد أثبتتْ ذلك فعلاً إحدى شركاتِ تسخينِ الوجباتِ. وظَّفتْ هذه الشركةُ خصائصَ عمليَّةِ التآكلِ باستخدامِ الماءِ المالحِ لتسخينِ وجباتِ الطعامِ.

تقدِّمُ هذه الشركةُ وجباتٍ معلَّبةً من الطعامِ تتضمَّنُ مصدرًا حراريًّا ذاتيًّا. يحتوي كلُّ صندوقِ وجبةِ طعامٍ على وعاءٍ للطعامِ وصينيَّةٍ مزوَّدةٍ بكيسٍ مساميٍّ يحتوي على مسحوقِ سبيكةٍ من Mg و Fe، وكيسٍ سعتُهُ $57\ cm^3$ مليءٍ بماءٍ مالحٍ. عندما يُسكبُ الماءُ المالحُ في الصينيَّةِ مع الكيسِ المساميِّ يحدثُ تفاعلُ تآكلِ المعادنِ بقوَّةٍ. يوضعُ الطعامُ نصفُ المطبوخِ والمحفوظُ جيّدًا داخل كيسٍ مغلقٍ فوق الصينيَّةِ، ثم يعادُ إلى الصندوقِ حيث ترتفعُ درجةُ الحرارةِ إلى حواليَ $55°C$، ما يؤدّي إلى تسخينِ الطعامِ خلالَ 14 دقيقةً.

يَستخدِمُ هذا المنتَجُ عمليَّةَ التآكلِ المفرطِ لتزويدِكَ بوجبةٍ ساخنةٍ.

إن عمليَّةَ تآكلِ المعادنِ مع الهواءِ، كما في حالةِ تآكلِ الحديدِ نتيجةَ لصَدَئِه، هي عمليَّةٌ بطيئةٌ وغيرُ مرغوبةٍ. وفي حالةِ الوجباتِ ذاتيَّةِ التسخينِ تسرِّعُ عمليَّةُ التآكلِ باستخدامِ مسحوقٍ من هذا الفلزِّ فتتكوّنُ طاقةٌ إضافيَّةٌ تسرِّعُ تسخينَ الطعامِ.

إن فكرةَ استخدامِ السبائكِ المعدنيَّةِ ذاتيَّةِ التسخينِ كانت موجودةً منذ الثلاثينيّاتِ، إلا أنها لم توضعْ موضعَ الاستخدامِ أو الإنتاجِ الصناعيِّ إلا مؤخَّرًا لتحضيرِ وجباتٍ ساخنةٍ سريعةِ التحضيرِ وذاتيَّةِ التسخينِ. وفي الآونةِ الأخيرةِ صُنعتْ هذه الوجباتُ لسائقي شاحناتِ المسافاتِ الطويلةِ.

وتمتلكُ الشركةُ خططًا لتطويرِ منتجاتٍ أخرى، باستخدامِ عمليَّةِ التآكلِ السريعِ المسيطَرِ عليه، مثل: المشروباتِ الساخنةِ، ورضّاعاتِ الأطفالِ المسخَّنةِ، وأقداحٍ للقهوةِ أو الشايِ أو الكاكاو ذاتيَّةِ التسخينِ.

أسئلة

1. إذا رُفعتْ درجةُ حرارةِ $50.0\ mL$ من الماءِ من $25.0°C$ إلى $100.°C$ باستخدامِ علبةِ الوجبةِ ذاتيَّةِ التسخينِ، فكم تكونُ قيمةُ التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ لتفاعلِ المغنيسيومِ في هذه العلبةِ؟

القســـم 2-5

مؤشّراتُ الأداء

- يوضحُ العلاقةَ بين قيمةِ ΔH وإمكانيَّةِ حدوثِ تفاعلٍ.
- يوضحُ العلاقةَ بين تغيُّرِ الإنتروبي وإمكانيَّةِ حدوثِ تفاعلٍ.
- يحسبُ قيمةَ الطاقةِ الحرَّةِ ويفسِّرُ دالَّتَها.
- يوظِّفُ تغيُّرَ الطاقةِ الحرَّةِ لتحديدِ إمكانيَّةِ حدوثِ تفاعلٍ.

القوى الدافعةُ للتفاعلاتِ

يعتبرُ التغيُّرُ في طاقةِ نظامِ تفاعلٍ ما واحدًا من عامِلَيْنِ يعتمدُهُ الكيميائيّونَ لتوقُّعِ إمكانيَّةِ حدوثِ التفاعلِ تلقائيًّا، وتفسيرِ كيفيَّةِ حدوثِه. أما العاملُ الثاني الذي يحدِّدُ تلقائيَّةَ حدوثِ التفاعلِ فهو عشوائيَّةُ الجسيماتِ في ذلك النظامِ.

التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ والميلُ إلى التفاعلِ

معظمُ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ في الطبيعةِ هي تفاعلاتٌ طاردةٌ للحرارةِ. وعند حصولِها تنطلقُ الطاقةُ، وتكونُ طاقةُ النواتجِ أقلَّ من طاقةِ المتفاعلاتِ الأصليَّةِ، وكذلك تكونُ النواتجُ أكثرَ مقاومةً للتغيُّرِ، وأكثرَ استقرارًا من المتفاعلاتِ الأصليَّةِ. والميلُ الطبيعيُّ للتفاعلِ هو أن يحدثَ في اتجاهٍ يؤدّي إلى حالةٍ أدنى من الطاقةِ.

ويعتقدُ الكثيرون أن التفاعلاتِ الماصَّةَ للحرارةِ لا تحدثُ تلقائيًّا لأن للنواتجِ طاقةً كامنةً أعلى واستقراريَّةً أقلَّ من المتفاعلاتِ الأصليَّةِ. وهذا يجعلُنا نتوقَّعُ أن تحدثَ التفاعلاتُ فقط بمساعدةِ تأثيراتٍ خارجيَّةٍ، كالتسخينِ المستمرِّ مثلاً. غيرَ أن بعضَ التفاعلاتِ الماصَّةِ للحرارةِ تحدثُ بصورةٍ تلقائيَّةٍ. وهذا ما يجعلُنا نستخلصُ أن شيئًا آخرَ، عدا التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ، يساعدُ على تحديدِ إمكانيَّةِ حدوثِ التفاعلِ.

الإنتروبي والميلُ إلى التفاعلِ

الانصهارُ من العمليّاتِ الماصَّةِ للحرارةِ التي تحدثُ طبيعيًّا. فمكعَّبُ الثلجِ ينصهرُ تلقائيًّا عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ، وذلك بانتقالِ الطاقةِ من الهواءِ المحيطِ الدافئِ إلى الثلجِ. وعندها يُفقَدُ الترتيبُ المنتظمُ لجزيئاتِ الماءِ في بلَّورةِ الثلجِ، فتتكوَّنُ حالةُ السيولةِ ذاتُ الترتيبِ الأقلِّ انتظامًا وذاتُ محتوى الطاقةِ الأعلى. إن انتقالَ النظامِ من حالةٍ إلى أخرى، دونما تغيُّرٍ في المحتوى الحراريِّ، يحدثُ بزيادةٍ في الإنتروبي.

لاحظِ الحالاتِ الفيزيائيَّةَ للمتفاعلاتِ والنواتجِ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الخاصَّةِ بتفكُّكِ نيتراتِ الأمونيومِ التاليةِ:

$$2NH_4NO_3(s) \rightarrow 2N_2(g) + 4H_2O(l) + O_2(g)$$

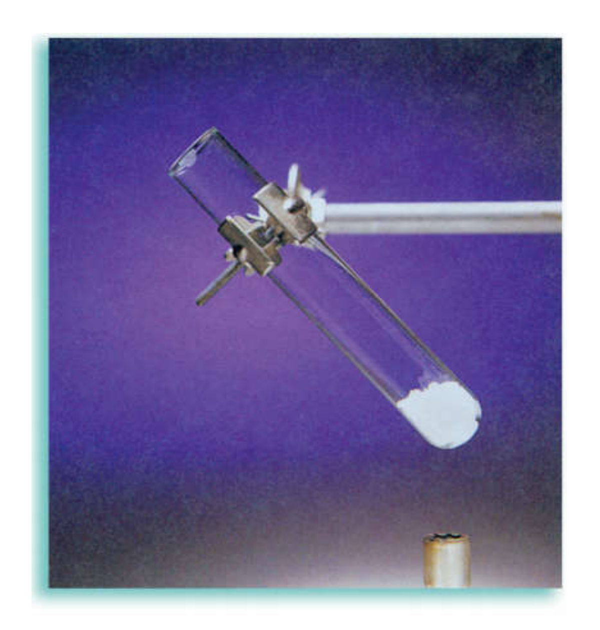
في الطرفِ الأيسرِ من المعادلةِ 2 mol من نيتراتِ الأمونيومِ الصلبِ، بينما يظهرُ في الطرفِ الأيمنِ من المعادلةِ 3 mol من الجزيئاتِ الغازيَّةِ مع 4 mol من سائلٍ. يكونُ

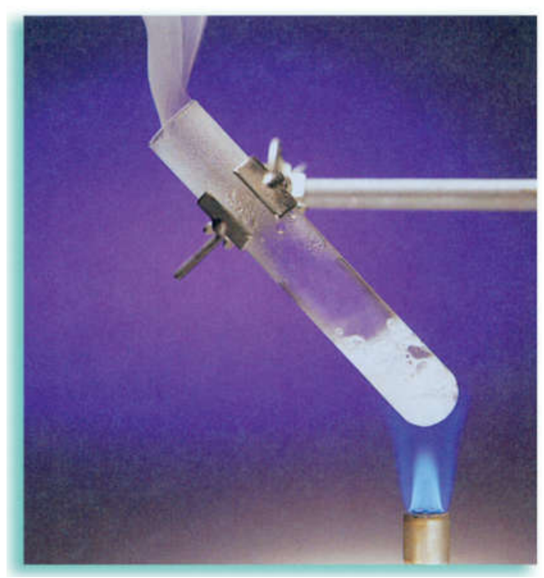
ترتيبُ الجسيماتِ في طرفِ المعادلةِ الأيمنِ أكثرَ عشوائيَّةً منه في الطرفِ الأيسر، وبذلك يكونُ ترتيبُ الجسيماتِ في الطرفِ الأيمنِ أقلَّ انتظامًا. يوضحُ الشكلُ 5-6أ و 5-6ب المادَّةَ المتفاعلةَ والنواتجَ لتفاعلِ التفكُّكِ هذا.

توضحُ هذه الأمثلةُ أن التغيُّراتِ التي تطرأُ على نظامٍ ما تميلُ إلى زيادةِ عشوائيَّةِ النظام. والنظامُ العشوائيُّ هو ذلك النظامُ الذي تفتقرُ مكوِّناتُه إلى الترتيبِ المنتظم. والميلُ إلى العشوائيَّةِ يسمّى الإنتروبي. تعرَّفُ **الإنتروبي entropy**، S، بطريقةٍ وصفيَّةٍ بسيطةٍ. ***إنها قياسُ درجةِ عشوائيةِ الجسيماتِ، مثل الجزيئاتِ، في نظامٍ معيَّن.*** ولاستيعابِ مفهومِ الإنتروبي ندرسُ حالاتِ المادَّةِ الثلاثَ، الصلبةَ والسائلةَ والغازيَّةَ. ففي الحالةِ الصلبةِ الجسيماتُ ثابتةٌ في حيِّزها الضيِّقِ من الفضاءِ، لكنها تهتزُّ جيئةً وذهابًا. ومع ذلك، يمكنُنا تحديدُ موقعِ هذه الجسيماتِ بدقةٍ معقولةٍ. ولأن درجةَ العشوائيَّةِ في هذا النظامِ منخفضةٌ، تكونُ الإنتروبي بدورِها منخفضةً. وعند انصهارِ المادَّةِ الصلبةِ تبقى الجسيماتُ قريبةً بعضُها من بعض، لكن مع مجالٍ أكبرَ للحركةِ. وعند ذاك يصبحُ النظامُ أكثرَ عشوائيَّةً، مما يجعلُ عمليَّةَ تحديدِ موقعِ الجسيماتِ أكثرَ صعوبةً، وتصبحُ الإنتروبي أعلى. وعند تبخُّرِ السائلِ تتحرَّكُ الجسيماتُ بسرعةٍ مع بقائِها متباعدةً نسبيًّا، وتصبحُ عمليَّةُ إيجادِ مواقعِ جسيماتٍ معيَّنةٍ في هذا النظامِ العشوائيِّ أكثرَ صعوبةً. وهكذا تصبحُ إنتروبي الغازِ أعلى من إنتروبي السائلِ. وهناك قاعدةٌ عامَّةٌ، لكن غيرُ مطلقةٍ، تقولُ: إن إنتروبي السائلِ تزيدُ عن إنتروبي المادَّةِ الصلبةِ، وإنتروبي الغازِ تزيدُ عن إنتروبي السائلِ. إلا أن التعاملَ مع هذه القاعدةِ يجبُ أن يتمَّ بشيءٍ من الحذرِ. فعلى سبيلِ المثالِ، إنتروبي الزئبقِ السائلِ أقلُّ بكثيرٍ من إنتروبي بعضِ الموادِّ الصلبةِ.

إن إنتروبي صلبٍ بلّوريٍّ نقيٍّ تكونُ صفرًا عند درجةِ الصفرِ المطلق. ومع زيادةِ الطاقةِ تزدادُ عشوائيَّةُ حركةِ الجزيئاتِ. لذلك تُستخدمُ قياساتُ الطاقةِ المتصَّةِ وحساباتُها لتحديدِ الإنتروبي الموليَّةِ القياسيَّةِ. تسجَّلُ القيمُ حينئذٍ في جداولَ خاصَّةٍ، ويعبَّرُ عنها بوحدةِ kJ/(mol•K). ويعرفُ تغيُّرُ الإنتروبي الذي يمكنُ قياسُهُ أيضًا، بالفرقِ بين إنتروبي النواتجِ وإنتروبي المتفاعلاتِ. لذلك، يمكنُ تمثيلُ الزيادةِ في الإنتروبي بالقيمةِ الموجبةِ لـ ΔS، ويمثَّلُ النقصانُ في الإنتروبي بالقيمِ السالبةِ لـ ΔS.

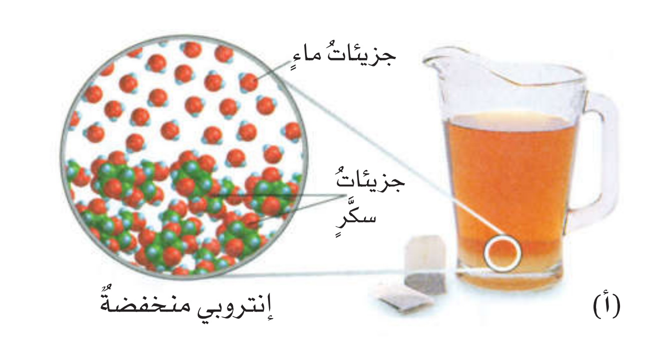
تتضمنُ عمليةُ تكوينِ المحاليلِ، في معظمِ الأحيانِ زيادةً في الإنتروبي لوجودِ زيادةٍ في العشوائيَّةِ. ويصحُّ ذلك أيضًا على عمليَّةِ مزجِ الغازاتِ وإذابةِ سائلٍ في سائلٍ آخرَ، كما تصحُّ على عمليَّةِ إذابةِ صلبٍ في سائلٍ.

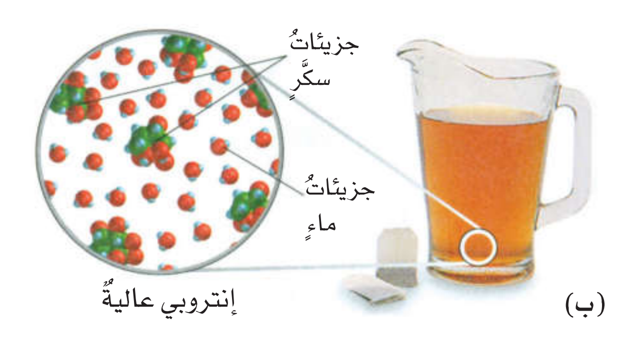




الشكل 5-6 عند تفكُّكِ نيتراتِ الأمونيوم NH_4NO_3 تزدادُ إنتروبي النظام، لأن (أ) متفاعلاً واحدًا صلبًا يتحوَّلُ إلى (ب) ناتجين غازيين وناتجٍ سائلٍ.

الشكل 5-7 يوضحُ تغيُّرَ الإنتروبي الذي يحصلُ عند ذوبانِ السكرِ في الشاي (محلول سائل). في نظامِ السكَّرِ-الماءِ، المبيَّن في الشكل 5-7أ، أضيفَ السكَّرُ إلى الشاي في الحالِ، إلا أن الجزءَ الأكبرَ منه لم يذبْ فعلاً. في هذه الحالةِ تكونُ الإنتروبي منخفضةً، لأن غالبيَّةَ جزيئاتِ السكَّرِ مستقرَّةٌ في قعرِ الكأسِ، ومعظمَ جزيئاتِ الماءِ منتشرةٌ في أنحاءِ الكأسِ كلِّها. وبعد أن يذوبَ السكَّرُ في الشاي، كما يبيِّنُهُ الشكلُ 5-7ب، تختلطُ جزيئاتُ السكَّرِ مع جزيئاتِ الماءِ بشكلٍ تامٍّ. ويمكنُ عندها أن تجدَ جزيئاتِ السكرِ وجزيئاتِ الماءِ في جميعِ أنحاءِ المحلولِ. هكذا تزدادُ الإنتروبي بزيادةِ عشوائيَّةِ النظامِ. وهو ما يعطي قيمةً موجبةً لـ ΔS في نظامِ الصلبِ-السائلِ هذا. ويمكنُ تخيُّلُ حصولِ السلسلةِ ذاتِها من الأحداثِ لنظامٍ مكوَّنٍ من غازاتٍ تختلطُ بعضُها مع بعضٍ، أو نظامٍ من عدَّةِ سوائلَ مختلطةٍ. وفي كلتا الحالتَينِ تأخذُ ΔS قيمةً موجبةً عند تكوُّنِ المحلولِ.





الشكل 5-7 عند ذوبانِ الصلبِ في السائلِ تزدادُ إنتروبي النظامِ.

الطاقةُ الحرَّةُ

تحدثُ العمليّاتُ في الطبيعةِ في اتجاهَينِ اثنَينِ: نحو الحدِّ الأدنى من الطاقةِ ونحو الحدِّ الأعلى من العشوائيَّةِ. عندما تتعارضُ هاتانِ الحالتانِ يحدِّدُ العاملُ الغالبُ وجهةَ التغيُّرِ. ولتحديدِ أيِّ العاملَينِ يكونُ الغالبَ في نظامٍ معيَّنٍ، تمَّ تعريفُ دالّةِ علاقةٍ تربطُ عاملَيِ التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ والإنتروبي عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ وتحت ضغطٍ ثابتٍ. ***تسمَّى الدالّةُ التي تربطُ التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ بالإنتروبي الطاقةَ الحرَّةَ* free energy** *أو G، لذلك النظامِ، أو طاقةَ جيبس الحرَّةِ.* تعيِّنُ هذه الدالّةُ بصورةٍ متزامنةٍ ميلَ التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ والإنتروبي نحو التغيُّرِ. وتستمرُّ العمليّاتُ الطبيعيَّةُ عادةً في اتجاهِ تقليلِ الطاقةِ الحرَّةِ للنظامِ.

التغيُّرُ في الطاقةِ الحرَّةِ يمكنُ قياسُهُ. ويمكنُ تعريفُهُ بدلالةِ التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ وتغيُّرِ الإنتروبي. ***عند شروطٍ ثابتةٍ من درجةِ الحرارةِ والضغطِ، يمكنُ تعريفُ التغيُّرِ في الطاقةِ الحرَّةِ* free-energy change**، *ΔG، لكلِّ نظامٍ بأنه الفرقُ بين ΔH، وحاصلِ ضربِ درجةِ الحرارةِ بالكلفن في تغيُّرِ الإنتروبي أي $T\Delta S$.*

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

لاحظْ أن هذا التعبيرَ يطبَّقُ على الموادِّ في حالتِها القياسيَّةِ فقط، وأن للناتجِ $T\Delta S$ والكميتَينِ ΔG و ΔH الوحداتِ نفسَها، وهي عادةً kJ/mol. ووحداتُ ΔS المستخدمةُ في هذه المعادلةِ هي عادةً kJ/(mol•K). إذا كانت $\Delta G < 0$ يكونُ التفاعلُ تلقائيًّا.

يمكنُ لكلٍّ من ΔH و ΔS في معادلةِ الطاقةِ الحرَّةِ أن يأخذا قيمًا سالبةً أو موجبةً، ما يؤدّي إلى تكوينِ أربعةِ احتمالاتٍ يعرضُها الجدولُ 5-2.

أوَّلُها عندما تكونُ ΔH سالبةً و ΔS موجبةً. إن العاملَينِ يساهمانِ لكي تكونَ العمليَّةُ تلقائيَّةً، فإذن تكونُ ΔG سالبةً دائمًا، والتفاعلُ يكونُ تلقائيًّا بشكلٍ مؤكدٍ. ومن ناحيةٍ

أخرى، عندما تكونُ ΔH موجبةً (تفاعلٌ ماصٌّ للحرارةِ) و ΔS سالبةً (نقصانٌ في العشوائيَّةِ) تكونُ ΔG موجبةً ويكونُ التفاعلُ غيرَ تلقائيٍّ. وعندما يكونُ التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ ΔH و التغيُّرُ في الإنتروبي ΔS يعملانِ في اتجاهَينِ مختلفَينِ، يكونُ أحدُهما غالبًا تارةً ويكونُ الآخرُ غالبًا تارةً أخرى. هناك تفاعلاتٌ تكونُ فيها ΔH سالبةً و ΔS سالبةً هي الأخرى. في هذه التفاعلاتِ يؤدّي عاملُ ΔH إلى العمليَّةِ التلقائيَّةِ، إلا أن ΔS السالبةَ تقاومُ ذلك. والأمرُ كذلك في التفاعلِ التالي، حيث تقلُّ الإنتروبي لنقصانٍ في عددِ المولاتِ الغازيَّةِ.

$$C_2H_4(g) + H_2(g) \rightarrow C_2H_6(g)$$

في هذه المعادلةِ يوجدُ نقصانٌ كبيرٌ في الإنتروبي، $\Delta S = -0.1207\ kJ/(mol\bullet K)$، مع أن التفاعلَ طاردٌ للحرارةِ بشكلٍ كبيرٍ، وتكونُ فيه قيمةُ $\Delta H^0 = -136.9\ kJ/mol$. يستمرُّ التفاعلُ لأن عاملَ ΔH هو الغالبُ.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 = -136.9\ kJ/mol - 298\ K[-0.1207\ kJ/(mol\bullet K)]$$
$$= -101.1\ kJ/mol$$

يمكنُ مقارنةُ هذا بالطريقةِ التجاريَّةِ الشائعةِ في تصنيعِ غازِ الاصطناعِ، المكوّنِ من خليطٍ من CO و H_2 (هذا الخليطُ الغازيُّ هو نقطةُ البدايةِ للإنتاجِ الصناعيِّ لعددٍ من المركَّباتِ الكيميائيَّةِ التجاريَّةِ ذاتِ الحجمِ الكبيرِ، كالميثانول CH_3OH).

$$CH_4(g) + H_2O(g) \rightarrow CO(g) + 3H_2(g)$$

هذا التفاعلُ ماصٌّ للحرارةِ و $\Delta H^0 = +206.1\ kJ/mol$ و $\Delta S = +0.215\ kJ/(mol\bullet K)$، تحت الشروطِ القياسيَّةِ. يكونُ الناتجُ ΔG موجبًا عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ. وهذا يدلُّ على أن التفاعلَ لن يحدثَ عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ حتى وإن كانَ التغيُّرُ في الإنتروبي ملائمًا.

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 = +206.1\ kJ/mol - 298\ K[+0.215\ kJ/(mol\bullet K)]$$
$$= +142.0\ kJ/mol$$

الكيمياءُ تطبيقيًا

هل يبقى الماسُ إلى الأبدِ ماسًا؟

يتواجدُ الكربونُ في أشكالٍ متعدِّدةٍ، منها الجرافيتُ والماسُ. إن التغيُّرَ في الطاقةِ الحرَّةِ للماسِ لدى تحوُّلِهِ إلى جرافيتٍ تحت شروطٍ حراريَّةٍ قياسيَّةٍ يساوي -3 kJ/mol. بما أن قيمةَ ΔG سالبةٌ في هذا التفاعلِ، فالماسُ يجبُ أن يتحوَّلَ تلقائيًّا إلى جرافيتٍ عند درجةِ حرارةِ 25°C وتحت ضغطٍ جويٍّ واحدٍ. إذن، لماذا لا تتحوَّلُ كلُّ الحليِّ الماسيَّةِ إلى جرافيتٍ تحت هذه الشروطِ؟ إنها لا تتحوَّلُ لأن سرعةَ التفاعلِ لهذا التغيُّرِ التلقائيِّ بطيءٌ جداً ولا يكادُ يلاحَظُ. ولذلك فإن الماسَ عند درجةِ حرارةِ 25°C وتحت ضغطٍ جويٍّ واحدٍ لا يبقى ماسًا إلى الأبدِ، إلا أنه يبقى ماسًا إلى أمدٍ طويلٍ. وهذا ربمّا يدفعُنا إلى إعادةِ التفكيرِ في كنزِ الحليِّ والمجوهراتِ عملاً بقولِهِ تعالى: من سورةِ التوبةِ 34.

﴿وَالَّذِينَ يَكْنِزُونَ الذَّهَبَ وَالْفِضَّةَ وَلَا يُنفِقُونَهَا فِي سَبِيلِ اللَّهِ فَبَشِّرْهُم بِعَذَابٍ أَلِيمٍ ﴿٣٤﴾﴾

الجدول 2-5 الربطُ بين إمكانيَّةِ حدوثِ التفاعلِ وبين تغيُّراتِ المحتوى الحراريِّ والإنتروبي والطاقةِ الحرَّةِ.

ΔH	ΔS	ΔG	طبيعةُ التفاعلِ
قيمةٌ سالبةٌ (تفاعلٌ طاردٌ للحرارةِ)	قيمةٌ موجبةٌ (أكثرُ عشوائيَّةً)	سالبةٌ دائمًا	تلقائيٌّ دائمًا
قيمةٌ سالبةٌ (تفاعلٌ طاردٌ للحرارةِ)	قيمةٌ سالبةٌ (أقلُّ عشوائيةً)	سالبةٌ عند درجاتِ الحرارةِ المنخفضةِ	تلقائيٌّ عند درجاتِ الحرارةِ المنخفضةِ
قيمةٌ موجبةٌ (تفاعلٌ ماصٌّ للحرارةِ)	قيمةٌ موجبةٌ (أكثرُ عشوائيةً)	سالبةٌ عند درجاتِ الحرارةِ المرتفعةِ	تلقائيٌّ عند درجاتِ الحرارةِ المرتفعةِ
قيمةٌ موجبةٌ (تفاعلٌ ماصٌّ للحرارةِ)	قيمةٌ سالبةٌ (أقلُّ عشوائيةً)	لا تكونُ سالبةً أبدًا	غيرُ تلقائيٍّ دائمًا

مسألةٌ نموذجية 5-5

في التفاعل $NH_4Cl(s) \rightarrow NH_3(g) + HCl(g)$، وعند درجةِ حرارةِ 298 K، تكونُ $\Delta H^0 = 176$ kJ/mol و $\Delta S^0 = 0.285$ kJ/(mol•K). احسبْ قيمةَ ΔG^0، واذكرْ ما إذا كان التفاعلُ تلقائيًا في الاتجاهِ الأماميِّ عند 298 K.

الحلّ

1 حلِّلْ

المعطى: $\Delta H^0 = 176$ kJ/mol عند درجةِ حرارةِ 298 K

$\Delta S^0 = 0.285$ kJ/(mol•K) عند درجةِ حرارةِ 298 K

المجهول: ΔG^0 عند درجةِ حرارةِ 298 K

2 خطِّطْ

ΔS ،ΔH ،$T \rightarrow \Delta G$

يمكنُ حسابُ قيمةِ ΔG وفقًا للمعادلةِ التالية:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

3 احسبْ

$$\Delta G^0 = 176 \text{ kJ/mol} - 298 \text{ K}[0.285 \text{ kJ/(mol•K)}]$$
$$= 176 \text{ kJ/mol} - 84.9 \text{ kJ/mol}$$
$$= 91 \text{ kJ/mol}$$

4 قيِّمْ

تظهرُ القيمةُ الموجبةُ لـ ΔG أن هذا التفاعلَ لا يحصلُ تلقائيًّا عند درجةِ حرارةِ 298 K. وهو ما يلمسُهُ المتعلمُ عمليًّا عند تفاعلِ HCl تلقائيًّا مع NH_3 لتكوينِ NH_4Cl، وليس العكسُ.

تمارينُ تطبيقية

1. في عمليةِ التبخيرِ $Br_2(l) \rightarrow Br_2(g)$، و $\Delta H^0 = 31.0$ kJ/mol و $\Delta S^0 = 93.0$ J/(mol•K). ما أقلُّ درجةِ حرارةٍ تكونُ عندها هذه العمليَّةُ تلقائيَّةً؟

الجواب

1. أعلى من 333 K

مراجعةُ القسم 2-5

1. أيُّ نوعٍ من التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ يرجِّحُ تفاعلاً تلقائيًّا؟
2. ما الإنتروبي وما علاقتُها بتلقائيَّةِ التفاعلات؟
3. وضِّحِ التغيُّراتِ التي تحصلُ عند زيادةِ الإنتروبي.
4. عرِّفِ الطاقةَ الحرَّةَ واكتبِ العلاقةَ الرياضيَّةَ المعبِّرةَ عنها.
5. وضِّحِ العلاقةَ بين تغيُّرِ الطاقةِ الحرَّةِ وتلقائيَّةِ التفاعلات.
6. لماذا ازدادتِ الإنتروبي في التفاعلِ المذكورِ في المسألةِ النموذجية 5-5؟

تفكيرٌ ناقدٌ

7. **تطبيقُ نماذجَ:** تَتْلَفُ معظمُ الأنزيماتِ البيولوجيَّةِ عند تسخينِها فتفقدُ قدرتَها على تحفيزِ التفاعلات. تكونُ هذه العمليَّةُ (الأنزيمُ الأصليُّ ← الأنزيمُ المتلف) ماصَّةً للحرارةِ وتلقائيَّةً. أيُّ التركيبَين يكونُ أكثرَ انتظامًا (أقلَّ عشوائيَّةً) الأنزيمُ الأصليُّ أم الأنزيمُ المتلفُ؟ برِّرْ إجابتَك.

مراجعةُ الفصل 5

ملخّصُ الفصل

1-5

- تُعنى الكيمياءُ الحراريَّةُ بدراسةِ تغيُّراتِ الطاقةِ المصاحبةِ للتفاعلاتِ الكيميائيَّةِ والتغيُّراتِ الفيزيائيَّة.
- المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ هي المعادلةُ التي تتضمَّنُ كمّيَّةَ الطاقةِ المنطلقةِ أو الممتصَّةِ كحرارةٍ خلالَ التفاعلِ الكيميائيِّ.
- التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ هو كمّيَّةُ الطاقةِ التي يمتصُّها أو يُطلِقُها النظامُ على صورةِ حرارةٍ ضمنَ عمليَّةٍ تجري تحت ضغطٍ ثابت.
- حرارةُ التفاعلِ هي التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ الذي يحصلُ خلالَ التفاعلِ الكيميائيِّ.
- تكونُ ΔH سالبةً في التفاعلاتِ الطاردةِ للحرارةِ وموجبةً في التفاعلاتِ الماصَّةِ للحرارة.
- تميلُ المركَّباتُ ذاتُ حرارةِ التكوينِ السالبةِ الكبيرةِ إلى أن تكونَ مستقرَّةً، بينما تميلُ المركَّباتُ ذاتُ حرارةِ التكوينِ الموجبةِ الكبيرةِ أو قليلةِ السالبيةِ إلى أن تكونَ غيرَ مستقرَّةٍ.
- حرارةُ التكوينِ الموليَّةُ القياسيَّةُ هي التغيُّرُ الحراريُّ الذي يحصلُ لدى تكوُّنِ مولٍ واحدٍ من المركَّبِ من عناصرِه الأوّليَّةِ في حالتِها القياسيَّةِ عند درجةِ حرارةِ 25°C وتحت ضغطٍ جويٍّ واحدٍ.
- يسمّى التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ الحاصلُ في تفاعلِ الاحتراقِ حرارةَ الاحتراقِ.
- يمكنُ حسابُ حرارةِ التفاعلِ باستخدامِ قيمِ حرارةِ التكوينِ للموادِّ المتفاعلةِ والناتجةِ.

المفردات

الكيمياءُ الحراريَّةُ thermochemistry (127)
الكالوريمترُ (المسعرُ الحراريُّ) calorimeter (127)
درجةُ الحرارةِ temperature (127)
الجولُ joule (127)
الحرارةُ heat (128)
الحرارةُ النوعيَّةُ specific heat (128)
التغيرُ في المحتوى الحراريِّ enthalpy change (130)
حرارةُ التفاعلِ heat of reaction (130)
المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ thermochemical equation (131)
الحرارةُ الموليَّةُ للتكوينِ molar heat of formation (133)
حرارةُ الاحتراقِ heat of combustion (134)
قانونُ هس Hess's law (135)

2-5

- في الطبيعةِ تميلُ التفاعلاتُ إلى اتِّخاذِ مسارٍ نحو الحدِّ الأدنى من الطاقةِ.
- الإنتروبي هي مقياسٌ لعشوائيَّةِ النظامِ.
- يَجمعُ تغيُّرُ الطاقةِ الحرَّةِ بين تأثيراتِ تغيُّرِ الإنتروبي والتغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ ودرجةِ حرارةِ النظامِ. وهي، بشكلٍ عامٍّ، مقياسٌ للميلِ النهائيِّ إلى حدوثِ تفاعلٍ تلقائيٍّ.
- يكونُ التفاعلُ تلقائيًّا إذا صاحبَهُ نقصٌ في الطاقةِ الحرَّةِ. ولا يكونُ التفاعلُ تلقائيًّا إذا صاحبَهُ زيادةٌ في الطاقةِ الحرَّةِ.

المفردات

الإنتروبي entropy (143)
الطاقةُ الحرَّةُ free energy (144)
تغيُّرُ الطاقةِ الحرَّةِ free-energy change (144)

مراجعةُ الفصل 5

اختيارٌ من متعدِّد

1. أيُّ الظروفِ التاليةِ يؤدّي إلى تفاعلٍ تلقائيٍّ؟
أ. زيادةٌ في الإنتروبي ونقصانٌ في المحتوى الحراريِّ.
ب. زيادةٌ في الإنتروبي وزيادةٌ في المحتوى الحراريِّ.
ج. نقصانٌ في الإنتروبي ونقصانٌ في المحتوى الحراريِّ.
د. نقصانٌ في الإنتروبي وزيادةٌ في المحتوى الحراريِّ.

2. تغويزُ الفحمِ عمليَّةٌ لإنتاجِ الميثانِ عن طريقِ التفاعلِ التالي:

$$C(s) + 2H_2(g) \rightarrow CH_4(g) \qquad \Delta H = ?$$

ما قيمةُ ΔH لهذا التفاعلِ مستخدمًا المعادلاتِ الكيميائيَّةَ الحراريَّةَ التاليةَ؟

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) \qquad \Delta H = -394\ kJ$$

$$H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l) \qquad \Delta H = -286\ kJ$$

$$CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(l) \qquad \Delta H = -891\ kJ$$

أ. 75 kJ   ج. 1856 kJ
ب. −75 kJ   د. −1856 kJ

3. يمتصُّ عنصرانِ، لهما كتلتانِ متساويتانِ وحرارتانِ نوعيَّتانِ مختلفتانِ، كمِّيَّةً متساويةً من الحرارةِ. أيُّ العنصرَينِ يُظهرُ تغيُّرًا أقلَّ في درجاتِ الحرارةِ؟
أ. العنصرُ ذو الحرارةِ النوعيَّةِ الأعلى.
ب. العنصرُ ذو الحرارةِ النوعيَّةِ الأقلِّ.
ج. العنصرانِ يُظهرانِ التغيُّرَ نفسَه في درجةِ الحرارةِ.
د. لا يمكنُ التحديدُ انطلاقًا من هذه المعطياتِ.

4. أيٌّ من العمليّاتِ التاليةِ هي ذاتُ ΔS سالبةٍ؟
أ. تبخيرُ مولٍ واحدٍ من السائلِ.
ب. رفعُ درجةِ حرارةِ 1L من الماءِ من 295 K إلى 350 K.
ج. تجميدُ 1 mol من السائلِ.
د. لا شيءَ ممّا ذُكِرَ.

5. يكونُ التفاعلُ التالي طاردًا للحرارةِ تحت ضغطٍ ثابتٍ:

$$2NO_2(g) \rightarrow N_2O_4(g)$$

أيٌّ من العباراتِ التاليةِ يصفُ التفاعلَ المذكورَ أعلاه؟
أ. التفاعلُ تلقائيٌّ دائمًا.
ب. التفاعلُ يكونُ تلقائيًّا عند درجاتِ الحرارةِ المنخفضةِ، وليس عند درجاتِ الحرارةِ المرتفعةِ.
ج. التفاعلُ يكونُ تلقائيًّا عند درجاتِ الحرارةِ المرتفعةِ، وليس عند درجاتِ الحرارةِ المنخفضةِ.
د. التفاعلُ لا يكونُ تلقائيًّا مطلقًا.

مراجعةُ المفاهيم

6. قارنِ المحتوى الحراريَّ للنواتجِ في نظامِ تفاعلٍ معيَّنٍ بالمحتوى الحراريِّ للمتفاعلاتِ عندما يكونُ التفاعلُ
أ. ماصًّا للحرارةِ.   ب. طاردًا للحرارةِ.

7. أ. ميِّزْ بين حرارةِ التفاعلِ وحرارةِ التكوينِ وحرارةِ الاحتراقِ.
ب. ما الأساسُ الذي يُعتمَدُ لتعريفِ حرارةِ التكوينِ وحرارةِ الاحتراقِ؟

8. اكتبِ المعادلةَ المستخدمةَ لحسابِ قيمِ حرارةِ التفاعلِ من حرارةِ التكوينِ.

9. ما العواملُ المؤثِّرةُ في قيمةِ ΔH في نظامِ تفاعلٍ؟

10. اذكرْ قانونَ هسّ، وكيف يُستخدَمُ هذا القانونُ؟

11. هل تزدادُ الإنتروبي أم تقلُّ، عند تغيُّرِ الحالةِ الفيزيائيَّةِ التي يكونُ فيها المتفاعلُ غازًا أو سائلاً والناتجُ صلبًا؟ ما إشارةُ تغيُّرِ الإنتروبي؟

12. كيف تؤثِّرُ الزيادةُ في درجةِ الحرارةِ على إنتروبي نظامٍ ما؟

13. متى يعطي دائمًا ناتجُ قيمَتَيْ ΔH و ΔS تغيُّرًا سالبًا في الطاقةِ الحرَّةِ؟

14. وضِّحِ العلاقةَ بين درجةِ الحرارةِ وإمكانيَّةِ حدوثِ تفاعلٍ تلقائيٍّ.

مسائل

الحرارةُ النوعيَّةُ

15. احسبِ الحرارةَ اللازمةَ لرفعِ درجةِ حرارةِ عيِّنةِ ألمنيوم، كتلتُها 55 g، من 22.4°C إلى 94.6°C؟ راجعِ الجدولَ 1-5 لمعرفةِ قيمةِ الحرارةِ النوعيَّةِ للألمنيوم. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 1-5)

مراجعةُ الفصل 5

16. إذا أُضيفَ 3.5 kJ من الطاقةِ إلى عيِّنةِ حديدٍ كتلتُها 28.2 g عند درجةِ حرارةِ 20.0°C، فما الحرارةُ النهائيَّةُ للحديدِ مقيسةً بالكلفن؟ راجعِ الجدول 5-1 لمعرفةِ الحرارةِ النوعيَّةِ للحديدِ.

17. يلزمُك 70.2 J لرفعِ درجةِ حرارةِ 34.0 g من الأمونيا $NH_3(g)$، من 23.0°C إلى 24.0°C. احسبِ الحرارةَ النوعيَّةَ للأمونيا.

18. احسبْ c_p لمعدنِ الأنديوم In، علمًا أن 1.0 mol منه يمتصُّ 53 J عندما ترتفعُ درجةُ حرارتِهِ من 297.5 K إلى 299.5 K.

حرارةُ التفاعل

19. حدِّدْ لكلٍّ من المعادلاتِ التاليةِ قيمةَ ΔH، ونوعيَّةَ التفاعلِ-العمليَّة (ماصٌّ أم طاردٌ للحرارةِ).

أ. $C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 393.51\ kJ$

ب. $CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(l) + 890.31\ kJ$

ج. $CaCO_3(s) + 176\ kJ \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$

د. $H_2O(g) \rightarrow H_2O(l) + 44.02\ kJ$

20. أعدْ كتابةَ كلٍّ من المعادلاتِ التاليةِ، مضمِّنًا قيمةَ ΔH في جانبِ النواتجِ أو المتفاعلاتِ، وحدِّدْ نوعيَّةَ التفاعلِ (ماصٌّ أم طاردٌ للحرارةِ).

أ. $2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l)$ $\quad \Delta H^0 = -285.83\ kJ$

ب. $2Mg(s) + O_2(g) \rightarrow 2MgO(s)$ $\quad \Delta H^0 = -1200\ kJ$

ج. $I_2(s) \rightarrow I_2(g)$، $\Delta H^0 = +62.4\ kJ$

د. $3CO(g) + Fe_2O_3(s) \rightarrow 2Fe(s) + 3CO_2(g)$ $\quad \Delta H^0 = -24.7\ kJ$

21. وظفْ ملحقَ الجدولِ أ-5 لكتابةِ تفاعلِ تكوينِ كلٍّ من المركَّباتِ التاليةِ من عناصرِها الأوَّليَّةِ، واكتبْ ΔH كجزءٍ من التفاعلِ، وحدِّدْ قيمةَ ΔH للتفاعلِ العكسيِّ.

أ. $CaCl_2(s)$

ب. $C_2H_2(g)$ (إيثاين أو أسيتيلين)

ج. $SO_2(g)$

22. يدخلُ التفاعلُ

$$2Fe_2O_3(s) + 3C(s) \rightarrow 4Fe(s) + 3CO_2(g)$$

في عمليَّةِ صهرِ خامِ الحديدِ. وظفْ قيمَ ΔH_f المعطاةَ في ملحقِ الجدولِ أ-5 لحسابِ التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ خلالَ عمليَّةِ إنتاجِ 1 mol من الحديدِ.

23. وظِّفْ بياناتِ حرارةِ التكوينِ الواردةَ في ملحقِ الجدولِ (أ-5) لحسابِ حرارةِ تفاعلِ كلٍّ مما يلي.

أ. $CaCO_3(s) \rightarrow CaO(s) + CO_2(g)$

ب. $Ca(OH)_2(s) \rightarrow CaO(s) + H_2O(g)$

ج. $Fe_2O_3(s) + 3CO(g) \rightarrow 2Fe(s) + 3CO_2(g)$

24. الجلوكوزُ $C_6H_{12}O_6(s)$، له $\Delta H_f = -1263\ kJ/mol$. احسبِ التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ عندما يحترقُ 1 mol من الجلوكوزِ لتكوينِ $CO_2(g)$ و $H_2O(l)$.

25. احسبْ حرارةَ التفاعلِ القياسيَّةَ لتفاعلَي احتراقٍ يكونُ فيهما الإيثان C_2H_6، والبنزينُ C_6H_6، متفاعلَينِ بالتتالي، ويكونُ $CO_2(g)$ و $H_2O(l)$ الناتجَينِ في كلٍّ منهما، واحسبْ ذلك من خلالِ جمعِ المعادلاتِ الكيميائيَّةِ الحراريَّةِ المعروفةِ، مستخدمًا قيمَ ΔH_f المبيَّنةَ في ملحقِ الجدولِ (أ-5). تحققْ من النتائجِ باستخدامِ المعادلةِ العامَّةِ لإيجادِ حرارةِ التفاعلِ من حرارةِ التكوينِ.

أ. $C_2H_6(g) + O_2(g) \rightarrow$

ب. $C_6H_6(l) + O_2(g) \rightarrow$

26. حرارةُ تكوينِ الإيثانول C_2H_5OH، هي $-277.0\ kJ/mol$ عند درجةِ حرارةِ 298 K. احسبْ حرارةَ احتراقِ مولٍ من الإيثانولِ، مفترضًا أن النواتجَ هي $CO_2(g)$ و $H_2O(l)$. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 5-3)

حرارةُ التفاعلِ والطاقةُ الحرَّةُ

27. في تفاعلٍ له $\Delta H = -356\ kJ$ و $\Delta S = -36\ J/K$. احسبْ قيمةَ ΔG عند درجةِ حرارةِ 25°C. هل التفاعلُ تلقائيٌّ؟

28. تبلغُ قيمةُ ΔH في تفاعلٍ 98 kJ، وقيمةُ ΔS 292 J/K. حدِّدْ تلقائيَّةَ التفاعلِ عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ. هل لزيادةِ درجةِ الحرارةِ تأثيرٌ يذكرُ في تلقائيَّةِ التفاعلِ؟

29. تبلغُ قيمةُ ΔH في أحدِ التفاعلاتِ $-76\ kJ$، وقيمةُ ΔS $-117\ J/K$. احسبْ قيمةَ ΔG لتفاعلٍ يحدثُ عند درجةِ حرارةِ 298 K. هل هذا التفاعلُ تلقائيٌّ؟

30. تفاعلٌ في الحالةِ الغازيَّةِ لـ H_2 و CO_2 ينتجُ H_2O و CO. قيمةُ ΔH لهذا التفاعل 11 kJ وقيمةُ $\Delta S = 41$ J/K. هل يكونُ التفاعلُ تلقائيًّا عند درجةِ حرارةِ 298 K؟

31. احسبْ، بناءً على القيمِ التي ستَلي، قيمَ ΔG لكلِّ تفاعل، وتوقَّعْ إمكانيَّةَ حدوثِ التفاعلِ تلقائيًّا. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّة 5-4)

أ. $\Delta H = +125$ kJ/mol ، T = 293 K
$\Delta S = 0.0350$ kJ/(mol•K)

ب. $\Delta H = -85.2$ kJ/mol ، T = 127°C
$\Delta S = 0.125$ kJ/(mol•K)

ج. $\Delta H = -275$ kJ/mol ، T = 773 K
$\Delta S = 0.450$ kJ/(mol•K)

32. قيمةُ ΔS^0 للتفاعلِ المبيَّنِ في ما يلي، عند درجةِ حرارةِ 298 K، تبلغُ 0.00300 kJ/(mol•K). احسبْ ΔG^0 لهذا التفاعلِ وحدِّدْ إمكانيَّةَ حدوثِه تلقائيًّا عند درجةِ حرارةِ 298 K.

$$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 393.51 \text{ kJ}$$

مراجعةٌ متنوعة

33. عندما يتفاعلُ الجرافيتُ مع الهيدروجينِ عند درجةِ حرارةِ 300. K، تكونُ قيمةُ $\Delta H = -74.8$ kJ/mol وقيمةُ $\Delta S = -0.0809$ kJ/(mol•K). هل يحدثُ هذا التفاعلُ تلقائيًّا؟

34. كيف تغيِّرُ الظروفَ لإحداثِ تفاعلٍ ماصٍّ للحرارةِ لا يحصلُ عادةً بشكلٍ تلقائيٍّ؟

35. يمثِّلُ الشكلُ التوضيحيُّ اللاحقُ قانونَ هس للتفاعلِ التالي:

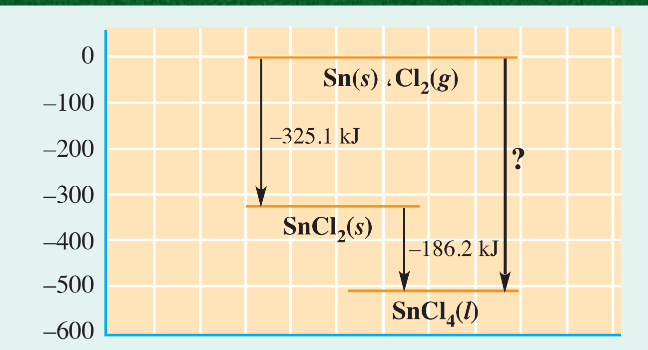
$$Sn(s) + 2Cl_2(g) \rightarrow SnCl_4(l)$$

استخدمِ الشكلَ البيانيَّ لتحديدِ قيمةِ ΔH لكلِّ خطوةٍ من الخطواتِ التاليةِ والتفاعلِ النهائيِّ.

$Sn(s) + Cl_2(g) \rightarrow SnCl_2(s)$ $\quad \Delta H = ?$

$SnCl_2(l) + Cl_2(g) \rightarrow SnCl_4(s)$ $\quad \Delta H = ?$

$Sn(s) + 2Cl_2(g) \rightarrow SnCl_4(l)$ $\quad \Delta H = ?$



36. تبلغُ حرارةُ تكوينِ ثنائي أكسيدِ الكبريتِ القياسيَّةُ -296.8 kJ/mol. احسبْ كميةَ الطاقةِ المنطلقةِ بالـ kJ عند تكوُّنِ 30.0 g من $SO_2(g)$ من عناصرِه.

37. لتفاعلِ الثرميتِ thermite المستخدمِ في لحامِ بعضِ المعادنِ التغيُّرانِ التاليانِ للحرارةِ والإنتروبي عند درجةِ حرارةِ 298 K. مع افتراضِ أنّ ΔS و ΔH قيمتانِ ثابتتانِ، احسبْ ΔG عند درجةِ حرارةِ 448 K.

$$Fe_2O_3(s) + 2Al(s) \rightarrow 2Fe(s) + Al_2O_3(s)$$

$\Delta H^0 = -851.5$ kJ/mol ، $\Delta S^0 = -38.5$ J/(mol•K)

38. أعدْ كتابةَ كلٍّ من المعادلاتِ التاليةِ، مضمِّنًا كتابتَك قيمةَ ΔH في جانبِ النواتجِ أو المتفاعلاتِ، وحدِّدْ نوعيَّةَ التفاعلِ (ماصٌّ أم طاردٌ للحرارةِ).

أ. $2SO_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2SO_3(g)$
$\Delta H = -197.8$ kJ

ب. $2NO_2(g) \rightarrow 2NO(g) + O_2(g)$
$\Delta H = +114.2$ kJ

ج. $C_2H_4(g) + 3O_2(g) \rightarrow 2CO_2(g) + 2H_2O(l)$
$\Delta H = -1411.0$ kJ

39. احسبْ حرارةَ التفاعلِ التالي:

$$4FeO(s) + O_2(g) \rightarrow 2Fe_2O_3(s)$$

استخدمْ بياناتِ حرارةِ التكوينِ الموضَّحةِ في ملحقِ الجدولِ (أ-5).

40. تفاعلُ تحضيرِ الميثانولِ (CH_3OH) صناعيًّا هو:

$$CO(g) + 2H_2(g) \rightarrow CH_3OH(g)$$

$\Delta H^0_{التفاعل} = -90.7$ kJ و $\Delta S^0_{التفاعل} = -220.8$ J/K.
ما أقلُّ درجةِ حرارةٍ لازمةٍ لإحداثِ هذا التفاعلِ؟

41. ما خاصَّةُ الكالوريمترِ المستخدمِ في تجاربِ الكيمياءِ الحراريةِ؟ ولماذا تكونُ هذه الخاصَّةُ جوهريَّةً؟

تفكيرٌ ناقد

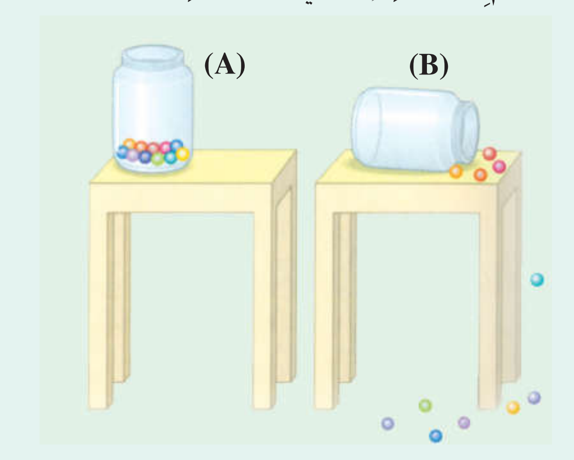
42. ربطُ أفكار: افترضْ أنك أُعطيتَ قيمةَ تغيُّرِ الإنتروبي لأوّلِ تفاعلَيْنِ من التفاعلاتِ التالية، احسبْ تغيُّرَ الإنتروبي للتفاعلِ الثالثِ.

$S_8(s) + 8O_2(s) \rightarrow 8SO_2(g)$ $\quad \Delta S = 89\ J/K$

$2SO_2(s) + O_2(s) \rightarrow 2SO_3(g)$ $\quad \Delta S = -188\ J/K$

$S_8(s) + 12O_2(s) \rightarrow 8SO_3(g)$ $\quad \Delta S = ?$

43. تفسيرُ مفاهيمَ: قارنْ بين الصورتينِ اللاحقتَينِ. أيُّهما تبدو أكثرَ انتظامًا؟ لماذا؟ هل هناك أيُّ تشابهٍ بين كمّيَّةِ انتظامِ الخرزاتِ وإنتروبي الجسيماتِ؟



44. استدلالٌ على استنتاج: تبلغُ قيمةُ ΔH في تفاعلٍ ماصٍّ للحرارةِ 8 kJ، ويحصلُ هذا التفاعلُ تلقائيًّا عند درجةِ حرارةِ 25°C. ما التغيُّرُ المتوقَّعُ للإنتروبي؟

45. استدلالٌ على استنتاج: إذا كان كلٌّ من ΔH و ΔS قيمةً سالبةً، فكيف تؤثِّرُ درجةُ الحرارةِ على تلقائيَّةِ التفاعلِ؟

46. استدلالٌ على علاقة: إذا كان التفاعلُ $X \rightarrow Y$ تلقائيًّا، فماذا يقالُ عن التفاعلِ $X \rightarrow Y$؟

47. تفسيرُ مفاهيمَ: لا يمكنُ تحديدُ المحتوى الحراريِّ، إنما يمكنُ فقط قياسُ التغيُّرِ فيه بينما يمكنُ تحديدُ الإنتروبي. فسِّرْ سببَ إمكانيَّةِ تحديدِ الإنتروبي.

تقويمٌ بديل

48. أداء: صمِّمْ كالوريمترًا بسيطًا لتحديدِ الحرارةِ الموليَّةِ لانصهارِ الثلجِ، باستخدامِ الموادِّ التاليةِ: كأسٍ من البلاستيكِ الرغويِّ مع غطائِهِ أو ترموس (حافظة)، ترمومترٍ، ميزانٍ، ماءٍ عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ، مكعَّبٍ من الثلجِ. اطلبْ إلى معلِّمِكَ أن يراجعَ التصميمَ الذي عملتَه. ثم نفِّذِ التجربةَ واكتبْ تقريرَكَ مضمِّنًا إيّاهُ حساباتِكَ ومقارنتَكَ للنتائجِ الكمّيَّةِ مع القيمِ المعلومةِ. حاولْ أن تعلِّلَ الاختلافاتِ بين النتائجِ التي توصَّلْتَ إليها وبين القيمِ الحقيقيةِ. حضِّرْ تقريرًا علميًّا يتضمنُ تصميمَ التجربةِ ونتائجَهَا وما توصلتَ إليه من استخلاصاتٍ.

49. صممْ تجربةً لقياسِ الحرارةِ النوعيَّةِ لكلٍّ من الخارصينِ والنحاسِ. إذا أقرَّ معلِّمُكَ التصميمَ، وفِّرِ الموادَّ المطلوبةَ لإجراءِ التجربةِ. بعد إنهاءِ التجربةِ قارنْ بين النتائجِ التي حصلْتَ عليها وبين النتائجِ الموجودةِ في المراجعِ الكيميائيَّةِ.

50. أداء: طوِّرْ طريقةَ عملٍ لقياسِ ΔH التفاعلِ المبينِ فيما يلي. وإذا أقرَّ معلِّمُكَ هذه الطريقةَ اختبرْها بقياسِ قيمةِ ΔH التفاعلِ، ثم حدِّدْ دقَّةَ الطريقةِ بمقارنةِ قيمةِ ΔH بقيمةِ ΔH المقبولةِ.

$$CH_3COONa(s) \rightarrow Na^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$$

مشروعٌ علميٌّ

51. نفِّذْ مشروعًا علميًّا بعنوانِ «حقيبةٌ لحفظِ الأغذيةِ ذاتيَّةِ التسخينِ».

سرعةُ التفاعلاتِ

باستطاعةِ علماءِ الكيمياءِ أن يحدِّدوا سرعةَ حدوثِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ

القسم 1-6

عمليَّةُ التفاعلِ

مؤشّراتُ الأداء

- يوضحُ المقصودَ بآليَّةِ التفاعلِ.
- يوظفُ نظريَّةَ التصادمِ لتفسيرِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ.
- يعرّفُ المعقَّدَ المنشَّطَ.
- يربطُ بين طاقةِ التنشيطِ وحرارةِ التفاعلِ.

توصَّلَ الكيميائيّونَ إلى أن التفاعلاتِ الكيميائيَّةَ تحدثُ بمعدَّلاتٍ متباينةٍ. فعلى سبيلِ المثالِ، يصدأُ الحديدُ ببطءٍ بوجودِ الهواءِ، بينما يحترقُ الميثانُ الموجودُ في الغازِ الطبيعيِّ بسرعةٍ. تعتمدُ سرعةُ التفاعلِ الكيميائيِّ على مسارِ الطاقةِ التي يتبعُها التفاعلُ والتغيُّراتُ التي تحصلُ لكلِّ جزيءٍ من الموادِّ المتفاعلةِ. في هذا الفصلِ ستدرسُ العواملَ المؤثِّرةَ في سرعةِ التفاعلِ الكيميائيِّ.

آليّاتُ التفاعلِ

إذا مزجتَ محلولَينِ مائيَّينِ لـ HCl و NaOH يحدثُ تفاعلُ تعادلٍ في غايةِ السرعةِ، كما يظهرُ في الشكلِ 1-6.

$$H_3O^+(aq) + Cl^-(aq) + Na^+(aq) + OH^-(aq) \rightarrow 2H_2O(l) + Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$

هذا التفاعلُ من الناحيةِ العمليَّةِ تلقائيٌّ، وتتحدَّدُ سرعةُ التفاعلِ فقط بسرعةِ انتشارِ أيوناتِ H_3O^+ و OH^- في الماءِ ليلتقيَ بعضُها ببعض. ومن ناحيةٍ ثانيةٍ، لا يكونُ التفاعلُ بين الأيوناتِ المتشابهةِ الشحنةِ أو بين الموادِّ الجزيئيَّةِ تلقائيًّا. فالأيوناتُ السالبةُ تتنافرُ كما تتنافرُ الأيوناتُ الموجبةُ. وفي الجزيئاتِ تتنافرُ السحبُ الإلكترونيَّةُ بشدةٍ عندما تتقاربُ ولا يتغلَّبُ على قوى التنافرِ هذه إلا الأيوناتُ والجزيئاتُ ذاتُ الطاقةِ الحركيَّةِ العاليةِ جدًّا، والتي تتفاعلُ إذا تقاربَتْ تقاربًا كافيًا. ستقتصرُ مناقشتنا في هذا الفصلِ على التفاعلاتِ التي تحدثُ بين الجزيئاتِ.

يحتوي غازُ الهيدروجينِ العديمُ اللونِ على أزواجٍ من ذرّاتِ الهيدروجينِ تترابطُ فيما بينها لتكوِّنَ جزيئاتٍ ثنائيَّةَ الذرّاتِ، H_2. وبخارُ اليودِ البنفسجيُّ اللونِ هو أيضًا ثنائيُّ الذرّاتِ، ومكوَّنٌ من أزواجٍ من ذرّاتِ اليودِ تترابطُ لتكوينِ جزيئاتِ اليودِ، I_2. ينتجُ عن التفاعلِ الكيميائيِّ بين هذَينِ الغازَينِ، عند درجاتِ الحرارةِ العاليةِ، يوديدُ الهيدروجينِ HI، وهو غازٌ عديمُ اللونِ. وتميلُ جزيئاتُ يوديدِ الهيدروجينِ بدورِها إلى التفكُّكِ وإعادةِ تكوينِ جزيئاتِ الهيدروجينِ واليودِ (غازٌ بنفسجيٌّ)، كما يظهرُ في الشكلِ 2-6. والمعادلتانِ الكيميائيَّتانِ التاليتانِ تصفانِ هذَينِ التفاعلَينِ:

$$H_2(g) + I_2(g) \rightarrow 2HI(g)$$
$$2HI(g) \rightarrow I_2(g) + H_2(g)$$

تشيرُ هاتانِ المعادلتانِ فقط إلى الجزيئاتِ التي تختفي والجزيئاتِ التي تنتجُ، ولا تُظهرانِ **آليَّةَ التفاعلِ reaction mechanism**، ***أي سلسلةَ خطواتِ التفاعلِ التي يحدثُ بموجبِها التغيُّرُ الكيميائيُّ الكلِّيُّ.***

الشكل 1-6 فورَ إضافةِ المحلولِ NaOH إلى المحلولِ HCl يحدثُ تفاعلُ تعادلٍ سريعٌ جدًّا. ويحوِّلُ فائضُ NaOH لونَ كاشفِ الفينولفثالينِ إلى اللونِ الزهريِّ.

ومع أن ما يلاحظُ مباشرةً، في معظمِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ، هو التغيُّرُ النهائيُّ للتفاعلِ، فإنه يمكنُ تصميمُ التجاربِ للتحقُّقِ من سلسلةِ الخطواتِ المحتملةِ في آليَّةِ التفاعلِ. إن كلَّ خطوةٍ من خطواتِ التفاعلِ هي في الحقيقةِ عمليَّةٌ بسيطةٌ. ويمكنُ تمثيلُها بمعادلةٍ تعبِّرُ عن الذرّاتِ أو الأيوناتِ أو الجزيئاتِ التي تشاركُ مشاركةً حقيقيَّةً في هذه الخطوةِ. حتى أن التفاعلَ الذي يظهرُ من المعادلةِ الموزونةِ وكأنه عمليَّةٌ بسيطةٌ هو في الحقيقةِ نتاجُ مجموعةِ خطواتٍ بسيطةٍ.

لقد اعتبرتْ عمليَّةُ تكوينِ يوديدِ الهيدروجينِ، كما يظهرُ في الشكل 6-2، لسنواتٍ عدَّةٍ مجرَّدَ عمليَّةِ تكوينٍ بسيطةٍ من خطوةٍ واحدةٍ، متضمِّنةً تفاعلاً بين الجزيئَين H_2 و I_2 في تفاعلٍ أماميٍّ، وتفكُّكَ جزيئيِّ HI في تفاعلٍ عكسيٍّ. غير أن التجاربَ أظهرتْ لاحقًا عدمَ حدوثِ تفاعلٍ مباشرٍ بين H_2 و I_2.

لذلك، اقتُرحتْ آليّاتٌ بديلةٌ لهذا التفاعلِ تعتمدُ على نتائجِ التجاربِ. فللحصولِ على المعادلةِ النهائيَّةِ يلزمُ جمعُ الخطواتِ، بعضِها إلى بعضٍ، في كلِّ آليَّةٍ من آليّاتِ التفاعلِ. لاحظْ عدمَ ظهورِ النوعينِ I و H_2I في المعادلةِ النهائيَّةِ بالرغمِ من وجودِهما في خطواتِ آليَّةِ التفاعلِ. ***تُعرَفُ الأنواعُ التي تظهرُ في بعضِ الخطواتِ، لكن ليس في المعادلةِ النهائيَّةِ، باسمِ الوسيطِ* intermediate**. (لاحظْ أن هذه الأنواعَ الوسيطةَ يلغي بعضُها بعضًا في الآليّاتِ التاليةِ.) والآليَّةُ المحتملةُ الأولى تتألَّفُ من مسارٍ مكوّنٍ من خطوتَين:

الخطوة 1: $I_2 \rightleftarrows 2I$

الخطوة 2: $2I + H_2 \rightleftarrows 2HI$

$I_2 + H_2 \rightleftarrows 2HI$

والآليَّةُ المحتملةُ الثانيةُ لها مسارٌ مكوّنٌ من ثلاثِ خطواتٍ.

الخطوة 1: $I_2 \rightleftarrows 2I$

الخطوة 2: $I + H_2 \rightleftarrows H_2I$

الخطوة 3: $H_2I + I \rightleftarrows 2HI$

$I_2 + H_2 \rightleftarrows 2HI$

ويعتبرُ التفاعلُ بين غازِ الهيدروجينِ وبخارِ اليودِ، لإنتاجِ غازِ يوديدِ الهيدروجينِ، مثالاً على **التفاعلِ المتجانسِ homogeneous reaction**، ***وهو التفاعلُ الذي تكونُ متفاعلاتُهُ ونواتجُهُ في حالةٍ فيزيائيَّةٍ واحدةٍ (صلبةٍ أو سائلةٍ أو غازيةٍ).***

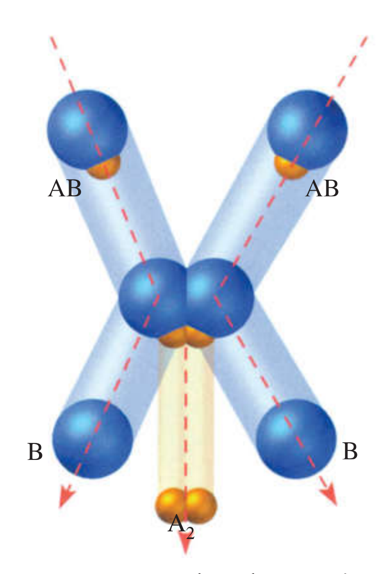
الشكل 6-2 يتكوَّنُ غازُ يوديدِ الهيدروجينِ العديمُ اللونِ، HI، من تفاعلِ غازِ الهيدروجينِ العديمِ اللونِ وغازِ اليودِ البنفسجيِّ.

نظريَّةُ التصادمِ

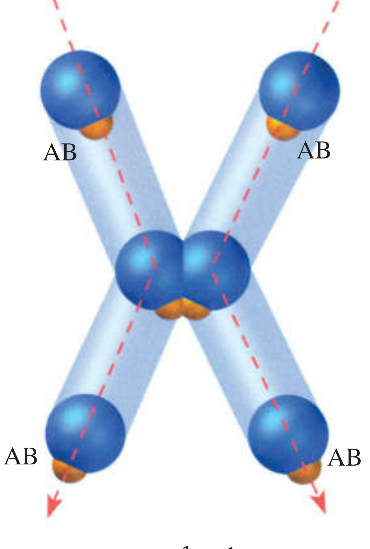
لكي يتمَّ التفاعلُ بين الموادِّ يجبُ أن تتصادمَ جسيماتُها (من جزيئاتٍ أو ذرّاتٍ أو أيوناتٍ)، وأن ينتجَ عن هذا التصادمِ تفاعلاتٌ. ***تعرفُ مجموعةُ الافتراضاتِ الخاصَّةِ بالتصادماتِ والتفاعلاتِ باسمِ نظريَّةِ التصادمِ* collision theory**. يستخدمُ الكيميائيّونَ هذه النظريَّةَ لتفسيرِ العديدِ من ملاحظاتِهم حول التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ.

تأمَّلْ ما يمكنُ حدوثُهُ، على المستوى الجزيئيِّ، في خطوةٍ واحدةٍ في نظامِ تفاعلٍ متجانسٍ. سنحاولُ أن نحلِّلَ خطوةً أولى مقترحةً في تفاعلِ التفكُّكِ الافتراضيِّ التالي:

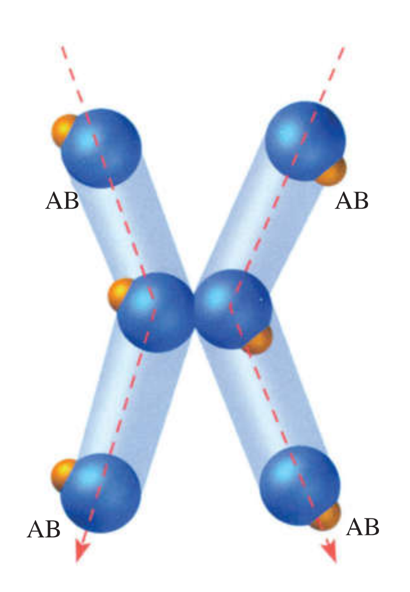
$$AB + AB \rightleftarrows A_2 + 2B$$



(أ) تصادمٌ فعّالٌ،
اتجاهٌ وطاقةٌ مناسبان



(ب) تصادمٌ غيرُ فعّالٍ
(طاقةٌ غيرُ كافيةٍ)



(ج) تصادمٌ غيرُ فعّالٍ،
اتجاهٍ غيرِ مناسبٍ

الشكل 6-3 في الشكلِ ثلاثةُ أنماطٍ لتصادماتٍ محتملةٍ بين الجزيئاتِ AB، إذ لا تؤدّي جميعُ التصادماتِ إلى تفاعلاتٍ كيميائيَّةٍ.

وفقًا لنظريةِ التصادمِ يجبُ أن يتصادمَ جزيئانِ من AB لكي يتفاعلا. فضلاً عن ذلك يجبُ أن يتصادما في اتجاهٍ مناسبٍ وبكمّيَّةٍ من الطاقةِ كافيةٍ لدمجِ إلكتروناتِ التكافؤِ وتكسيرِ روابطِ الجزيئاتِ AB. وإذا حصلَ ذلك فإن إعادةَ ترتيبِ الروابطِ سيؤدّي إلى تكوينِ النواتجِ، جزيءٍ واحدٍ A_2 وذرَّتَينِ من B. يظهرُ في الشكل 6-3أ نموذجٌ للتصادمِ الفعّالِ.

إذا كان التصادمُ ضعيفًا فالجزيئانِ يرتدانِ دون أن يتغيَّرا. كما في الشكل 6-3ب. وكذلك يكونُ غيرَ فعّالٍ التصادمُ الحاصلُ بين جزيئاتِ متفاعلاتٍ ذاتِ اتجاهٍ غيرِ مناسبٍ، وترتدُّ الجزيئاتُ المتصادمةُ دون تفاعلٍ، كما في الشكل 6-3ج.

يكوِّنُ التفاعلُ الكيميائيُّ روابطَ جديدةً بين ذرّاتٍ معيّنةٍ من الجزيئاتِ المتصادمةِ. وما لم ينتجْ عن التصادمِ تقاربٌ بين هذه الذرّاتِ التي تكونُ في اتجاهٍ مناسبٍ، فإن الجزيئاتِ لا تتفاعلُ. فعلى سبيلِ المثالِ، إذا حصلَ تصادمٌ بين جزيءِ كلورٍ والأكسجينِ من جزيءِ أوَّلِ أكسيدِ النيتروجينِ فمن المتوقَّعِ حدوثُ التفاعلِ التالي:

$$NO(g) + Cl_2(g) \rightarrow NOCl(g) + Cl(g)$$

ولا يحدثُ هذا التفاعلُ إذا صدمَ جزيءُ الكلورِ النيتروجينَ من الجزيءِ.

فلذلك، تزوِّدُنا نظريةُ التصادمِ هنا بتفسيرَيْنِ للسببِ الذي يجعلُ بعضَ التصادماتِ بين الجزيئاتِ المتفاعلةِ تفشلُ في إنتاجِ نوعٍ جديدٍ من النواتجِ. والتفسيرُ الأوَّلُ هو أن التصادمَ ليس له الطاقةُ الكافيةُ، والتفسيرُ الثاني هو أن الجزيئاتِ المتصادمةَ ليستْ في الاتجاهِ المناسبِ بشكلٍ يسمحُ لها بالتفاعلِ فيما بينها.

طاقةُ التنشيطِ

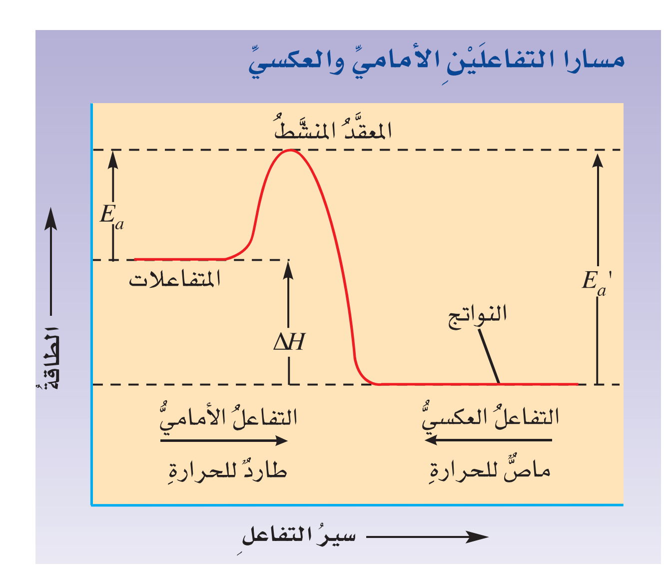
لاحظْ تفاعلَ تكوينِ الماءِ من غازَيِ الأكسجينِ والهيدروجينِ وفقًا للمعادلةِ التاليةِ:

$$2H_2(g) + O_2(g) \rightarrow 2H_2O(l)$$

إن حرارةَ التكوينِ مرتفعةٌ جدًّا: $\Delta H_f^{\,0} = -285.8$ kJ/mol عند درجةِ حرارةِ 298 K، وقيمةَ التغيُّرِ في الطاقةِ الحرَّةِ مرتفعةٌ هي الأخرى: $\Delta G^0 = -285.8$ kJ/mol. فلماذا إذن لا يتَّحدُ الأكسجينُ بالهيدروجينِ تلقائيًّا، في لحظةِ مزجِهما عند درجةِ حرارةِ الغرفةِ، لتكوينِ الماءِ؟

إن كلاًّ من غازِ الهيدروجينِ وغازِ الأكسجينِ يوجدُ كجزيئاتٍ ثنائيَّةِ الذرّاتِ. وعندما تتقاربُ الجزيئاتُ تتنافرُ السحبُ الإلكترونيَّةُ ولا تسمحُ بالتقاءِ الجزيئاتِ. ولحدوثِ التفاعلِ، يجبُ أن تتوافرَ كمِّيَّةٌ كافيةٌ من الطاقةِ الحركيَّةِ للجزيئاتِ المتصادمةِ لمزجِ إلكتروناتِ التكافؤِ. وبعبارةٍ أخرى يجبُ أن تتكسرَ روابطُ هذه الأنواعِ من الجزيئاتِ لكي تتكوَّنَ روابطُ جديدةٌ بين ذرّاتِ الأكسجينِ والهيدروجينِ. إن عمليةَ تكسُّرِ الرابطةِ عمليَّةٌ ماصَّةٌ للحرارةِ، بينما عمليَّةُ تكوُّنِ الرابطةِ هي عمليَّةٌ طاردةٌ للحرارةِ. ومع أن العمليَّةَ النهائيَّةَ لتكوينِ الماءِ عمليَّةٌ طاردةٌ للحرارةِ، فإن ذلك يتطلَّبُ توافرَ مقدارٍ من الطاقةِ الابتدائيَّةِ للتغلُّبِ على قوى التنافرِ التي تحصلُ بين جزيئاتِ المتفاعلاتِ لدى تقاربِها، تقومُ هذه الطاقةُ الابتدائيَّةُ بتنشيطِ التفاعلِ.

وفورَ ابتداءِ التفاعلِ الطاردِ للحرارةِ تكونُ الطاقةُ المنطلقةُ كافيةً لاستمرارِ التفاعلِ بفضلِ تنشيطِ الجزيئاتِ الأخرى. وبذلك، تبقى سرعةُ التفاعلِ في حالةِ تزايدٍ مستمرٍّ. ويحدِّدُ تزايدَها فقط الزمنُ اللازمُ لجسيماتِ المتفاعلاتِ كي تكتسبَ الطاقةَ وتبدأُ التصادمَ. تعملُ الطاقةُ ذاتُ المصدرِ الخارجيِّ، عادةً على وضعِ التفاعلاتِ الطاردةِ للحرارةِ على مسارِ التفاعلِ. يظهرُ الشكلُ 6-4 مسارًا عامًّا أماميًّا لتفاعلٍ طاردٍ للحرارةِ. إن كمِّيَّةَ الطاقةِ الدنيا اللازمةَ لتنشيطِ هذا التفاعلِ هي **طاقةُ التنشيطِ activation energy** الممثَّلةُ بـ E_a، ***وهي الحدُّ الأدنى من الطاقةِ اللازمةِ لتحويلِ المتفاعلاتِ إلى معقَّدٍ منشَّطٍ.***



الشكل 6-4 الفرقُ بين طاقاتِ تنشيطِ التفاعلَينِ الأماميِّ والعكسيِّ في تفاعلٍ انعكاسيٍّ يساوي التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ للتفاعلِ، ΔH. إن قيمةَ ΔH تبقى هي نفسَها في كلا الاتجاهَينِ، لكنها سالبةٌ في الاتجاهِ الطاردِ للحرارةِ وموجبةٌ في الاتجاهِ الماصِّ للحرارةِ.

إن التفاعلَ العكسيَّ، أي تفكُّكَ جزيئاتِ الماءِ، هو تفاعلٌ ماصٌّ للحرارةِ، لأن مستوى طاقةِ جزيئاتِ الماءِ أقلُّ من مستوى طاقةِ جزيئاتِ الهيدروجينِ والأكسجينِ. تحتاجُ جزيئاتُ الماءِ إلى طاقةِ تنشيطٍ أكبرَ قبل تفكُّكِها لإعادةِ تكوينِ الأكسجينِ والهيدروجينِ. إن الطاقةَ اللازمةَ لتنشيطِ تفاعلٍ ماصٍّ للحرارةِ، الممثلةَ بـ E_a' في الشكل 6-4، هي أكبرُ من الطاقةِ اللازمةِ للتغيُّرِ الأصليِّ الطاردِ للحرارةِ. والفرقُ بين E_a' و E_a يساوي التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ التفاعلِ، ΔH. إن لهذا التغيُّرِ في الطاقةِ القيمةَ العدديَّةَ نفسَها التي لكلٍّ من التفاعلِ الأماميِّ والتفاعلِ العكسيِّ، لكنَّ الإشارةَ مختلفةٌ.

المعقَّدُ المنشَّطُ

عند تصادمِ الجزيئاتِ يتحولُ قسمٌ من طاقتِها الحركيَّةِ العاليةِ إلى طاقةٍ كامنةٍ داخل الجزيئاتِ المتصادمةِ. وإذا تحوَّلَت كمّيَّةٌ كافيةٌ من هذه الطاقةِ تنشطُ الجزيئاتُ ذاتُ الاتجاهِ المناسبِ، وتتكوَّنُ عندئذٍ روابطُ جديدةٌ. في هذه الفترةِ القصيرةِ لتكسُّرِ وتكوُّنِ الروابطِ، يتكوَّنُ تركيبٌ في حالةٍ انتقاليَّةٍ transition state. وفي هذا التركيبِ الانتقاليِّ يبقى بعضُ الترابطِ موجودًا جزئيًّا ولا يكونُ مفقودًا تمامًا. ***والتركيبُ الانتقاليُّ الناتجُ عن التصادمِ الفعّالِ، والذي يبقى أثناء تكسُّرِ الروابطِ الأصليَّةِ وتكوُّنِ الروابطِ الجديدةِ، يسمّى المعقَّدُ المنشَّطُ activated complex.***

لنأخذ مثلاً تفاعلاً من خطوةٍ واحدةٍ لتفكُّكِ غازِ بروميدِ النيتروزِ BrNO الطاردِ للحرارةِ تبعًا للمعادلةِ التاليةِ:

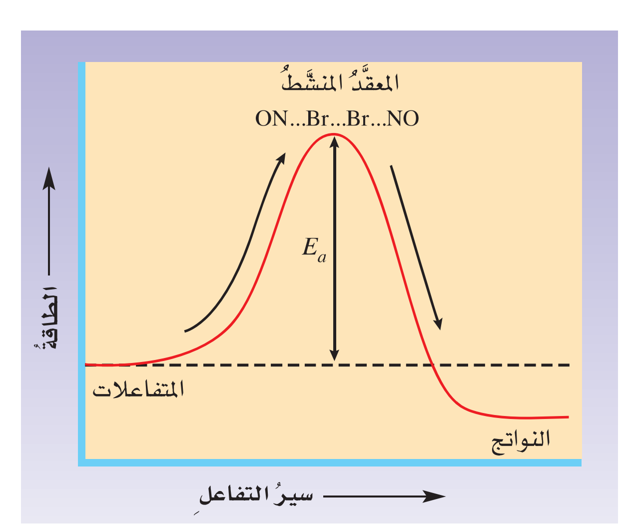
$$2BrNO(g) \rightarrow Br_2(g) + 2NO(g)$$

تتكسرُ في هذا التفاعلِ رابطتانِ من Br–N وتتكوّنُ بالمقابلِ رابطةٌ واحدةٌ من Br–Br. تتطلَّبُ عمليَّةُ كسرِ رابطةِ Br–N طاقةً عاليةً (243 kJ/mol). أثناء التصادمِ الفعّالِ بين جزيئَيْ BrNO يحدثُ، خلالَ فترةٍ قصيرةٍ، تكسُّرٌ جزئيٌّ لرابطتَيْ Br–N وتكوُّنٌ جزئيٌّ لرابطةِ Br–Br، مما يكوِّنُ تركيبًا انتقاليًّا ON...Br...Br...NO يُعرَفُ بالمعقَّدِ المنشَّطِ. يمثلُ المعقَّدُ المنشَّطُ أعلى نقطةٍ في منحنى الطاقةِ، كما يظهرُ في الشكلِ 6-5.

يتكوّنُ المعقَّدُ المنشَّطُ عندما يرفعُ التصادمُ الفعّالُ الطاقاتِ الداخليَّةَ للمتفاعلاتِ إلى الحدِّ الأدنى الملائمِ للتفاعلِ. وكما هو الأمرُ في الشكلِ 6-5 يمرُّ كلٌّ من التفاعلَيْنِ الأماميِّ والعكسيِّ خلالَ المعقَّدِ المنشَّطِ نفسِه. والرابطةُ التي انكسرَتْ في المعقَّدِ المنشَّطِ للتفاعلِ الأماميِّ يجبُ أن يعادَ تكوينُها في المعقَّدِ المنشَّطِ للتفاعلِ العكسيِّ. لاحظْ أن المعقَّدَ المنشَّطَ يقعُ في موقعِ الطاقةِ العالي على مسارِ التفاعلِ.

تنصُّ نظريَّةُ الحركةِ الجزيئيَّةِ على أن سرعاتِ الجزيئاتِ، وبالتالي طاقاتِها الحركيَّةَ، تزدادُ بتزايدِ درجاتِ الحرارةِ، وأن تزايدَ السرعةِ يسبِّبُ تصادماتٍ أكثرَ مما يزيدُ من عددِ التفاعلاتِ. لكنَّ الزيادةَ في معدَّلِ التفاعلاتِ لا يعتمدُ فقط على عددِ هذه التصادماتِ وحدَها، كما يبيِّنُهُ الشكلُ 6-3. يجبُ أن تحتويَ التصادماتُ بين الجزيئاتِ على كمّيَّةٍ كافيةٍ من الطاقةِ لتكوينِ المعقَّدِ المنشَّطِ، وإلا فإن التفاعلَ لن يحدثَ. وإن رفعَ درجةِ حرارةِ التفاعلِ يعرِّضُ جزيئاتٍ أكثرَ إلى طاقةِ التنشيطِ ويزيدُ من معدَّلِ التفاعلِ.

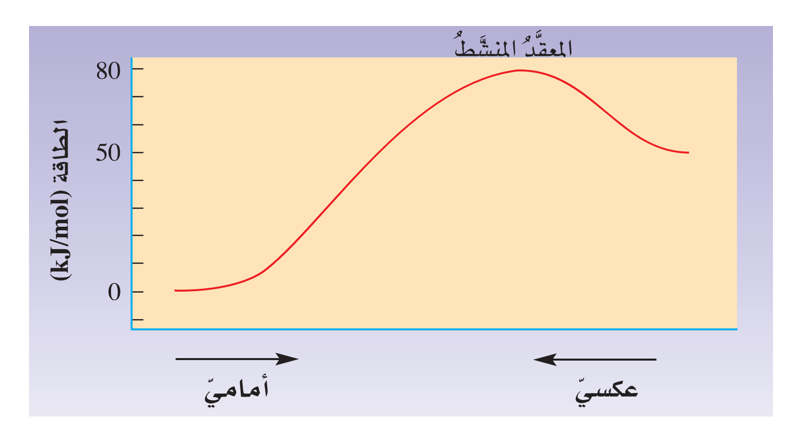
يكونُ للمعقَّداتِ المنشَّطةِ، في مراحلِ تكوُّنِها القصيرةِ، ترابطٌ جزئيٌّ. هذا الترابطُ يعدُّ حالةً وسطى لكلٍّ من المتفاعلِ والناتجِ. وقد يقومُ المعقَّدُ المنشَّطُ بإعادةِ تكوينِ الروابطِ الأصليَّةِ ثمَّ يعودُ فينفصلُ إلى جسيماتِ المتفاعلِ، أو قد يكوِّنُ روابطَ جديدةً وينفصلُ إلى جسيماتِ الناتجِ. وعلى عكسِ الموادِّ الوسيطةِ المستقرَّةِ نسبيًّا، فإن للمعقَّدِ المنشَّطِ عمرًا قصيرًا جدًّا تخضعُ خلالَهُ الروابطُ لعمليَّةِ تكسُّرٍ وتكوينٍ.



الشكل 6-5 يبيّنُ الرسمُ البيانيُّ عمليَّةَ تكوينِ المعقَّدِ المنشَّطِ خلالَ التفاعلِ الغازيِّ
$2BrNO(g) \rightarrow Br_2(g) + 2NO(g)$

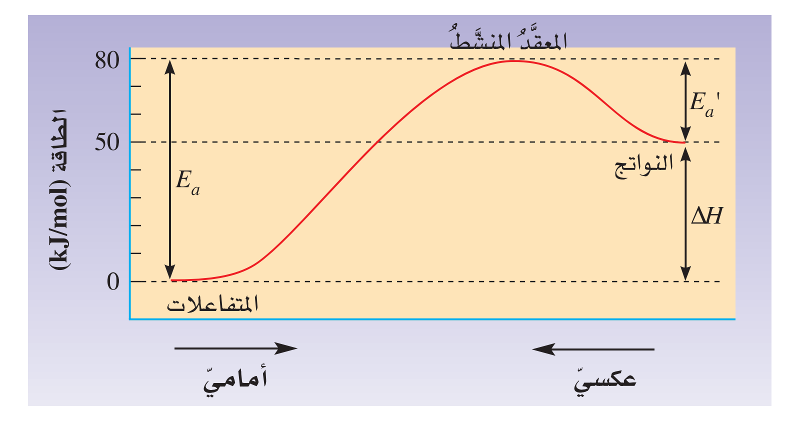
مسألةٌ نموذجية 1-6

تأمَّلِ الشكلَ البيانيَّ للطاقةِ المبيّنَ في الرسمِ التالي، وضعْ علاماتٍ للمتفاعلاتِ والنواتجِ، و ΔH، و E_a، و E_a' ثم احسبْ قيمَ كلٍّ من $\Delta H_{\text{أمامي}}$ و $\Delta H_{\text{عكسي}}$، و E_a، و E_a'.



الحلّ

يقعُ مستوى طاقةِ المتفاعلاتِ دائمًا في الطرفِ الأيسرِ من المنحنى، ويقعُ مستوى طاقةِ النواتجِ دائمًا في الطرفِ الأيمنِ من المنحنى. والتغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ للتفاعلِ ΔH، هو الفرقُ بين هذينِ المستويَين. تختلفُ طاقةُ التنشيطِ بين اتجاهَيِ التفاعلِ الأماميِّ والعكسيِّ، وهي أدنى طاقةٍ لازمةٍ لتحقيقِ تفاعلٍ فعّالٍ في كلا الاتجاهَين. أما E_a فهو الفرقُ بين مستوى طاقةِ المتفاعلاتِ وطاقةِ المعقَّدِ المنشَّطِ. وأما E_a' فهو الفرقُ بين مستوى طاقةِ النواتجِ وطاقةِ المعقَّدِ المنشَّطِ.



$\Delta H_{\text{أمامي}}$ = طاقةُ النواتجِ – طاقةُ المتفاعلاتِ

$$\Delta H_{\text{أمامي}} = 50 \text{ kJ/mol} - 0 \text{ kJ/mol} = +50 \text{ kJ/mol}$$

$\Delta H_{\text{عكسي}}$ = طاقةُ المتفاعلاتِ – طاقةُ النواتجِ

$$\Delta H_{\text{عكسي}} = 0 \text{ kJ/mol} - 50 \text{ kJ/mol} = -50 \text{ kJ/mol}$$

E_a = طاقةُ المعقَّدِ المنشَّطِ – طاقةُ المتفاعلاتِ

$$E_a = 80 \text{ kJ/mol} - 0 \text{ kJ/mol} = 80 \text{ kJ/mol}$$

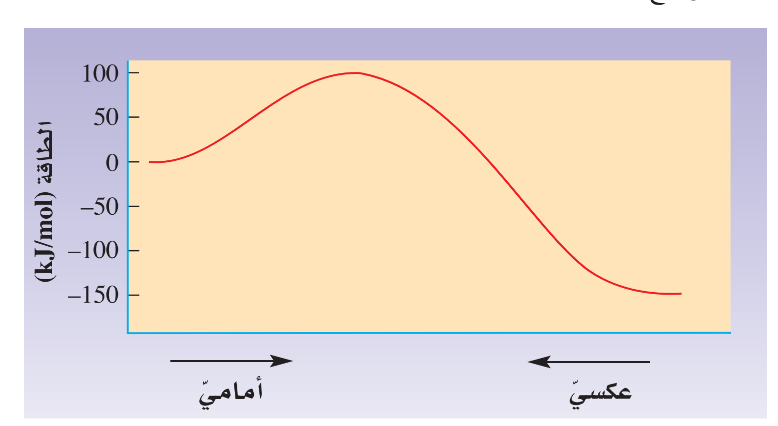
E_a' = طاقةُ المعقَّدِ المنشَّطِ – طاقةُ النواتجِ

$$E_a' = 80 \text{ kJ/mol} - 50 \text{ kJ/mol} = 30 \text{ kJ/mol}$$

تمارينُ تطبيقية

1. أ. استخدمِ الطريقةَ المبيَّنةَ في المسألةِ النموذجيَّةِ لرسمِ وترميزِ الشكلِ البيانيِّ التالي للطاقةِ. احسبْ قيمَ كلٍّ من: $\Delta H_{\text{أمامي}}$، $\Delta H_{\text{عكسي}}$، E_a، E_a'.

ب. هل التفاعلُ المبيَّنُ في الشكلِ البيانيِّ طاردٌ للحرارةِ أم ماصٌّ لها؟ وضِّحْ ذلك.



2. أ. ارسمْ ورمِّزْ شكلاً بيانيًّا للطاقةِ يشبهُ الشكلَ المبيَّنَ في المسألةِ النموذجيَّةِ للتفاعلِ الذي تكونُ فيه قيمةُ $E_a = 125$ kJ/mol، و $E_a' = 86$ kJ/mol. ضعِ المتفاعلاتِ على مستوى الطاقةِ صفرٍ.

ب. احسبْ قيمتَيْ $\Delta H_{\text{أمامي}}$ و $\Delta H_{\text{عكسي}}$.

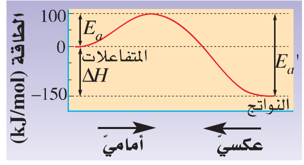
ج. أهذا التفاعلُ طاردٌ للحرارةِ أم ماصٌّ لها؟ فسِّرْ ذلك.

3. أ. ارسمْ ورمِّزْ شكلاً بيانيًّا للطاقةِ في التفاعلِ الذي يكونُ فيه $E_a = 154$ kJ/mol و $\Delta H = 136$ kJ/mol.

ب. احسبْ طاقةَ التنشيطِ، E_a'، للتفاعلِ العكسيِّ.

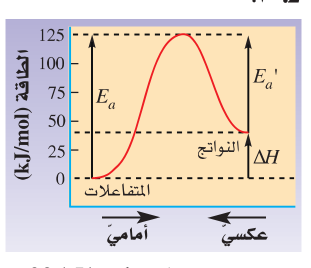
الجواب

1. أ. $\Delta H_{\text{أمامي}} = -150$ kJ/mol
$\Delta H_{\text{عكسي}} = +150$ kJ/mol
$E_a = 100$ kJ/mol
$E_a' = 250$ kJ/mol



ب. طاردةٌ للحرارةِ، طاقةُ المتفاعلاتِ أكبرُ من طاقةِ النواتجِ.

2. أ.



ب. $\Delta H_{\text{أمامي}} = 39$ kJ/mol
$\Delta H_{\text{عكسي}} = -39$ kJ/mol

ج. ماصّ للحرارةِ، طاقةُ النواتجِ أكبرُ من طاقةِ المتفاعلاتِ

3. أ.

ب. $E_a' = 18$ kJ/mol

مراجعةُ القسمِ 1-6

1. وضِّحِ المقصودَ بكلٍّ مما يلي: آليَّةُ التفاعلِ، طاقةُ التنشيطِ، المعقَّدُ المنشَّطُ.

2. ما العواملُ التي تحدِّدُ إمكانيَّةَ حدوثِ تفاعلٍ نتيجةً لتصادمٍ جزيئيٍّ؟

3. وضِّحِ العلاقةَ بين طاقةِ التنشيطِ وطاقةِ التفاعلِ.

4. ما الفرقُ بين المعقَّدِ المنشَّطِ والمركَّبِ الوسيطِ؟

5. علِّلْ: لا يحدثُ تفاعلٌ أحيانًا حتى وإن كان للتصادمِ طاقةٌ تفيضُ عن طاقةِ التنشيطِ.

تفكيرٌ ناقد

6. **تحليلُ معلومات:** أيٌّ مما يلي يتوافقُ مع معدَّلِ التفاعلِ الأسرعِ: آليَّةٌ ذاتُ طاقةِ تنشيطٍ قليلةٍ أم آليَّةٌ ذاتُ طاقةِ تنشيطٍ كبيرةٍ؟ برِّرْ إجابتَك.

القســـم 2-6

مؤشِّراتُ الأداء

- يعرِّفُ الكيمياءَ الحركيَّةَ ويوضِّحُ شرطَيّ حدوثِ التفاعلِ الكيميائيِّ.
- يوضحُ العواملَ المؤثِّرةَ في سرعةِ التفاعلِ.
- يعرِّفُ الحفّازَ واصفًا نوعَين مختلفَين منهُ.
- يربطُ بين رتبةِ التفاعلِ وقانون سرعة ذلك التفاعلِ.
- يستنتجُ قوانينَ سرعةِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ.

سرعةُ التفاعلِ الكيميائيِّ

يسمَى التغيُّرُ في تركيزِ المتفاعلات، خلالَ وحدةِ زمنٍ، عند حدوثِ التفاعل **سرعةَ التفاعل reaction rate**. إن دراسةَ سرعةِ التفاعل تُعنَى بالعوامل المؤثِّرةِ في السرعةِ، وتُعنَى بالعلاقاتِ الرياضيَّةِ التي تُظهرُ العلاقةَ بين السرعةِ والتركيز. ***يسمَى فرعُ الكيمياءِ الذي يُعنَى بسرعةِ التفاعلِ وآليَّاتِه*** **الكيمياءَ الحركيَّةَ chemical kinetics**.

العـواملُ المـؤثِّرةُ في الســرعـةِ

لحدوثِ أيِّ تفاعلٍ، باستثناءِ تفاعلِ التفكُّكِ الكيميائيِّ البسيطِ، يجبُ أن تتماسَّ الجسيماتُ فيما بينها في اتجاهٍ مناسبٍ وبطاقةِ تنشيطٍ كافيةٍ. لذلك فإن سرعةَ التفاعلِ تعتمدُ على عددِ تصادماتِ جسيماتِ المتفاعلاتِ وعلى فاعليةِ هذه التصادماتِ. وأيُّ تغيُّرٍ في ظروفِ التفاعلِ المؤثِّرةِ في عددِ التصادماتِ، أو طاقتِها أو في فاعليتِها، يؤثِّرُ في سرعةِ التفاعلِ نفسِها. وهنالك خمسةُ عواملَ على الأقلِّ تؤثِّرُ في سرعةِ التفاعلِ الكيميائيِّ.

طبيعةُ المتفاعلاتِ

تختلفُ الموادُّ في ميلِها إلى التفاعلِ، وتتباينُ فيما بينها كثيرًا. فعلى سبيلِ المثالِ، يتفاعلُ الهيدروجينُ بشدَّةٍ مع الكلورِ في شروطٍ تجريبيَّةٍ معيَّنةٍ. لكن الهيدروجينَ، تحت هذه الشروطِ نفسِها، يتفاعلُ ببطءٍ مع النيتروجين. ومن ناحيةٍ أخرى، يتَّحدُ الصوديومُ بالأكسجينِ بسرعةٍ أكبرَ من سرعةِ اتحادِ الحديدِ بالأكسجينِ تحت الشروطِ نفسِها. هنالك روابطُ تتكسرُ وأخرى تتكوَّنُ في التفاعلاتِ. وتعتمدُ سرعةُ التفاعلِ على طبيعةِ المتفاعلاتِ والروابطِ الكيميائيَّةِ المتعلقةِ بعمليَّةِ التفاعلِ.

المساحةُ السطحيَّةُ

يمكنُ للمخاليطِ الغازيَّةِ والجسيماتِ الذائبةِ أن تختلطَ وتتصادمَ بحرّيَّةٍ. لذلك قد تحدثُ التفاعلاتُ بينها بسرعةٍ. وفي التفاعلاتِ غيرِ المتجانسة، تعتمدُ سرعةُ التفاعلِ على مساحةِ سطحِ التماسِّ بين الموادِّ المتفاعلةِ. تتضمَّنُ **التفاعلاتُ غيرُ المتجانسة heterogeneous reactions** ***متفاعلاتٍ في حالتَين فيزيائيتَين مختلفتَين***. وتحدثُ هذه التفاعلاتُ عندما تتلامسُ الحالتانِ الفيزيائيَّتانِ، لذا تُعدُّ المساحةُ السطحيةُ للمتفاعلِ الصلبِ عاملاً مهمًّا في تحديدِ سرعةِ التفاعلِ. وإن الزيادةَ في المساحةِ السطحيَّةِ يزيدُ من سرعةِ التفاعلاتِ غيرِ المتجانسةِ.

فمثلاً يتفاعلُ الخارصينُ الصلبُ مع محلولِ حمضِ الهيدروكلوريك لإنتاجِ كلوريدِ الخارصين وغازِ الهيدروجين، وفقًا للمعادلةِ التاليةِ:

$$Zn(s) + 2HCl(aq) \rightarrow ZnCl_2(aq) + H_2(g)$$

يحدثُ هذا التفاعلُ على سطحِ الخارصينِ الصلبِ. إن مكعَّبًا من الخارصينِ طولُ ضلعِهِ 1 cm يمثِّلُ مساحةً سطحيَّةً معرَّضةً للتفاعلِ مقدارُها $6\ cm^2$. أما الكمّيَّةُ نفسُها من الخارصينِ، لكن بشكلٍ مسحوقٍ دقيقٍ، فتزوِّدُنا بمساحةٍ معرَّضةٍ للتفاعلِ أكبرَ بآلافِ المراتِ من مساحةِ المكعَّبِ السطحيَّةِ. وبالتالي، سرعةُ التفاعلِ لمسحوقِ المادَّةِ الصلبةِ أكبرُ بكثيرٍ من سرعةِ تفاعلِ قطعةِ المادَّةِ الصلبةِ قبلَ سحقِها.

وكذلك تحترقُ قطعةٌ من الفحمِ الحجريِّ ببطءٍ عندما تشتعلُ في الهواءِ، لكن سرعةَ الاحتراقِ تزدادُ عند تكسيرِها إلى قطعٍ صغيرةٍ، والسببُ هو تعرُّضُ مساحاتٍ سطحيَّةٍ أكبرَ لعمليَّةِ الاحتراقِ. وإذا حوِّلَتْ قطعةُ الفحمِ الحجريِّ إلى مسحوقٍ ثم أُشعلَتْ وهي معلقةٌ في الهواءِ فإنها تحترقُ بشكلٍ انفجاريٍّ، وهذا ما يفسِّرُ حصولَ الانفجاراتِ في مناجمِ الفحمِ الحجريِّ.

درجةُ الحرارةِ

الزيادةُ في درجةِ الحرارةِ تزيدُ الطاقةَ الحركيَّةَ لجسيماتِ المادَّةِ. ويؤدّي ذلك إلى حدوثِ عددٍ أكبرَ من التصادماتِ الفعّالةِ لدى تعرُّضِ المادَّةِ للتفاعلِ مع مادةٍ أخرى. فإذا ازدادَ عددُ التصادماتِ الفعّالةِ تزدادُ سرعةُ التفاعلِ.

لكي تكونَ طاقةُ التصادمِ مؤثِّرةً يجبُ أن تكونَ قيمتُها مساويةً لطاقةِ التنشيطِ أو أكبرَ منها، وعند درجاتِ الحرارةِ العليا يكتسبُ عددٌ أكبرُ من الجسيماتِ طاقةً كافيةً لتكوينِ معقَّداتٍ منشَّطةٍ لدى حدوثِ التصادماتِ. لذلك، ينتجُ عن الارتفاعِ في درجاتِ الحرارةِ زيادةٌ في طاقةِ التصادمِ وفي عددِها.

أما انخفاضُ درجةِ حرارةِ نظامِ التفاعلِ فله تأثيرٌ معاكسٌ، إذ تقلُّ الطاقةُ الحركيَّةُ للجسيماتِ بحيث تتصادمُ بعددٍ أقلَّ وبطاقةٍ أقلَّ، منتجةً تصادماتٍ فعّالةً أقلَّ. ابتداءً من درجةِ حرارةِ الغرفةِ تتضاعفُ تقريبًا سرعةُ تفاعلِ العديدِ من التفاعلاتِ الشائعةِ مع كلِّ 10 K (10^oC) من الارتفاعِ في درجةِ الحرارةِ. وهذه القاعدةُ يجبُ استخدامُها بشيءٍ من الحذرِ، إذ إن الزيادةَ الحقيقيَّةَ في سرعةِ التفاعلِ المرتبطةَ بارتفاعِ درجةِ الحرارةِ يجبُ أن تحدَّدَ بالطرقِ التجريبيَّةِ فقط.

التركيز

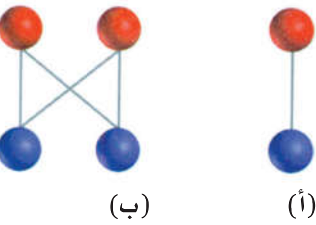
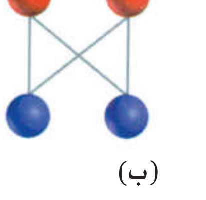
يزيدُ تركيزُ جزيئاتِ الأكسجينِ النقيِّ 5 مراتٍ عن تركيزِها في الهواءِ، تحت الضغطِ نفسِه. لذلك فإن الموادَّ تتأكسدُ بسرعةٍ أكثرَ في الأكسجينِ النقيِّ منها في الهواءِ. فعلى سبيلِ المثالِ، يبيِّنُ الشكلُ 6-6 أن الضوءَ المنبعثَ من قطعةِ الفحمِ المشتعلةِ في جوٍّ من الأكسجينِ النقيِّ يكونُ أقوى من الضوءِ المنبعثِ من قطعةِ الفحمِ المسخَّنةِ في الهواءِ حتى تبدأ بالاحتراقِ. إن تأكسُدَ الفحمِ هو من نوعِ التفاعلِ غيرِ المتجانسِ الذي يكونُ فيه أحدُ المتفاعلاتِ غازًا. لا تعتمدُ سرعةُ التفاعلِ على المساحةِ السطحيَّةِ للفحمِ فقط، بل تعتمدُ أيضًا على تركيزِ المادَّةِ المتفاعلةِ، O_2.

في أنظمةِ التفاعلاتِ المتجانسةِ تعتمدُ سرعةُ التفاعلِ على تركيزِ المتفاعلاتِ، ومن الصعبِ وضعُ معادلةٍ رياضيَّةٍ تربطُ بين السرعةِ والتركيزِ، لأن معظمَ التفاعلاتِ تحدثُ في سلسلةٍ متتاليةٍ من الخطواتِ، وإن إحدى هذه الخطواتِ فقط تحدِّدُ سرعةَ التفاعلِ. وإذا ازدادَ عددُ التصادماتِ الفعّالةِ تزدادُ سرعةُ التفاعلِ. وبشكلٍ عامٍّ يُتوقَّعُ زيادةٌ في

(أ)

(ب)

الشكل 6-6 احتراقُ الكربونِ أسرعُ في الأكسجينِ النقيِّ (أ) من احتراقِهِ في الهواءِ (ب) وذلك لأن تركيزَ الأكسجينِ (O_2) يكونُ أكبرَ.

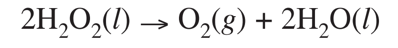



الشكل 6-7 يؤثِّرُ عددُ جزيئاتِ الأنواعِ المتفاعلةِ في عددِ التصادماتِ المحتملةِ، ومن ثَمَّ في سرعةِ التفاعلِ.

سرعةِ التفاعلِ كلما زادَ تركيزُ واحدٍ أو أكثرَ من المتفاعلاتِ، كما يظهرُ في النموذجِ في الشكلِ 6-7. في نظامِ تفاعلٍ مكوَّنٍ من جزيئَينِ، كما في الشكلِ 6-7 أ، يمكنُ حدوثُ تصادمٍ واحدٍ محتملٍ. وإذا تكوَّنَ النظامُ من أربعةِ جزيئاتٍ، كما في الشكلِ 6-7 ب، يمكنُ توقُّعُ أربعةِ تصادماتٍ محتمَلةٍ. وبزيادةِ عددِ الجزيئاتِ تحت شروطٍ ثابتةٍ، يزدادُ العددُ الكلِّيُّ للتصادماتِ المحتملةِ بينها. يظهرُ الشكل 6-7 ج، د نظامَينِ من 5 جزيئاتٍ و 8 جزيئاتٍ. وهذانِ النظامانِ يسمحانِ بـ 6 تصادماتٍ و 16 تصادمًا محتملاً على الترتيبِ. من ناحيةٍ أخرى يُحدِثُ تقليلُ التركيزِ تأثيرًا عكسيًّا. إن التأثيرَ الحقيقيَّ في سرعةِ التفاعلِ نتيجةً لتغيُّراتِ التركيزِ، يجبُ أن يحدَّدَ عمليًّا.

وجودُ الحفّازاتِ

تحدثُ بعضُ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ بشكلٍ بطيءٍ، وفي بعضِ الأحوالِ، يمكنُ زيادةُ سرعةِ التفاعلِ بشكلٍ متسارعٍ جدًّا لدى إضافةِ الحفّازِ. **والحفّازُ catalyst** ***مادةٌ تغيِّرُ سرعةَ التفاعلِ الكيميائيِّ دون أن تُستهلكَ. وفعلُ الحفّازِ يعرفُ بالتحفيزِ*** **catalysis**. يُظهرُ الشكلُ 6-8 تحفيزَ تفاعلِ تفكُّكِ بيروكسيدِ الهيدروجينِ بواسطةِ ثاني أكسيدِ المنجنيزِ. يزوِّدُ الحفّازُ مسارًا بديلاً للطاقةِ. يكونُ الحفازُ فعّالاً في تكوينِ معقّداتٍ منشَّطةٍ بديلةٍ تحتاجُ إلى طاقةِ تنشيطٍ أقلَّ. كما يظهرُ في مساراتِ طاقةِ تفكُّكِ بيروكسيدِ الهيدروجينِ H_2O_2 بفعلِ حفّازاتٍ مختلفةٍ، المبيَّنِ في الشكلِ 6-9، وفقًا للمعادلةِ التاليةِ:



$$2H_2O_2(l) \rightarrow O_2(g) + 2H_2O(l)$$

لا يظهرُ الحفّازُ كأحدِ النواتجِ النهائيَّةِ للتفاعلِ الذي قامَ بتسريعِه. ويمكنُ أن يشاركَ في خطوةٍ واحدةٍ من خطواتِ مسارِ التفاعلِ، ويمكنُ استعادتُهُ في خطوةٍ أخرى لاحقةٍ. في أنظمةِ التفاعلاتِ الواسعةِ النطاقِ والمكلِّفةِ يُستخلَصُ الحفّازُ ويعادُ استخدامُه. ***والحفّازُ الذي يكونُ في الحالةِ الفيزيائيَّةِ نفسِها للموادِّ المتفاعلةِ والناتجةِ، في نظامِ تفاعلٍ كيميائيٍّ، يسمَّى الحفازَ المتجانسَ*** **homogeneous catalyst**. ***وعندما تختلفُ حالتهُ الفيزيائيَّةُ عن حالةِ المتفاعلاتِ يسمَّى الحفازَ غيرَ المتجانسِ*** **heterogeneous catalyst**. تستخدَمُ المعادنُ عادةً كحفّازاتٍ غيرِ متجانسةٍ. ويعزِّزُ تحفيزُ العديدِ من التفاعلاتِ من خلالِ امتزازِ المتفاعلاتِ على سطوحِ المعادنِ، مما يزيدُ من تركيزِ تلك المتفاعلاتِ.

الشكل 6-8 يمكنُ زيادةُ سرعةِ التفاعلِ لدى تفكُّكِ بيروكسيدِ الهيدروجينِ H_2O_2، باستخدامِ الحفّازِ. والحفازُ المستخدَمُ هنا هو ثاني أكسيدِ المنجنيزِ، MnO_2، وهو مادَّةٌ صلبةٌ سوداءُ اللونِ توضعُ في كأسٍ زجاجيَّةٍ ويضافُ إليها، تدريجًا وبالتنقيطِ، 30% من محلولِ H_2O_2. يتفكَّكُ H_2O_2 بسرعةٍ إلى O_2 و H_2O. ويظهرُ كلٌّ من O_2 و H_2O على شكلِ غازٍ، لأن الطاقةَ المنطلقةَ من التفاعلِ تسبِّبُ تبخُّرَ معظمِ الماءِ المتكوِّنِ.

الشكل 9-6 يمكنُ تقليلُ طاقةِ تنشيطِ تفاعلٍ كيميائيٍّ بإضافةِ حفّازٍ مناسبٍ.

قوانينُ سرعةِ التفاعلاتِ

تحدَّدُ العلاقةُ بين سرعةِ تفاعلٍ وبين تركيزِ أحدِ المتفاعلاتِ عمليًّا من خلالِ تثبيتِ تراكيزِ المتفاعلاتِ الأخرى ودرجةِ حرارةِ النظامِ، ثم بقياسِ سرعةِ التفاعلِ بوجودِ تراكيزَ مختلفةٍ للمتفاعلِ المعنيِّ. ستكشفُ سلسلةٌ من هذه التجاربِ المختبريَّةِ كيف يؤثِّرُ تركيزُ كلِّ متفاعلٍ على سرعةِ التفاعلِ.

يتفاعلُ غازُ الهيدروجينِ مع أحادي أكسيدِ النيتروجينِ عند ثباتِ الحجمِ ودرجةِ حرارةٍ مرتفعةٍ وثابتةٍ، وفقًا للمعادلةِ التاليةِ:

$$2H_2(g) + 2NO(g) \rightarrow N_2(g) + 2H_2O(g)$$

حيث يتمُّ إنتاجُ 3 mol من الناتجَينِ الغازيَّينِ من 4 mol من المتفاعلَينِ الغازيَّينِ. لهذا يأخذُ ضغطُ النظامِ في الانخفاضِ تدريجيًّا مع حدوثِ التفاعلِ. وبذلك، يمكنُ تحديدُ سرعةِ التفاعلِ بقياسِ تغيُّرِ الضغطِ في الوعاءِ، مع مرورِ الوقتِ.

افترضْ أن سلسلةً من التجاربِ أُجريتْ باستخدامِ التركيزِ الابتدائيِّ نفسِهِ لأحادي أكسيدِ النيتروجينِ، لكن مع تراكيزَ ابتدائيةٍ مختلفةٍ للهيدروجينِ، ووُجدَ أن سرعةَ التفاعلِ الابتدائيَّةَ تتغيَّرُ طرديًّا مع تركيزِ الهيدروجينِ، بحيثُ تتضاعفُ السرعةُ بتضاعفِ تركيزِ H_2. فإذا تضاعفَ تركيزُ H_2 إلى ثلاثةِ أمثالِ التركيزِ الابتدائيِّ تتضاعفُ سرعةُ التفاعلِ إلى ثلاثةِ أمثالِ السرعةِ الابتدائيَّةِ، وهكذا. عندها إذا مثَّلتَ

R سرعةَ التفاعلِ، ومثَّلَتْ $[H_2]$ تركيزَ الهيدروجينِ بـ mol/L، تصبحُ العلاقةُ الرياضيَّةُ بين السرعةِ والتركيزِ كما يلي:

$$R \propto [H_2]$$

الرمزُ $\propto$ يشيرُ إلى التناسبِ.

لنفترضِ الآن أننا ثبَّتْنا تركيزَ الهيدروجينِ الابتدائيَّ كما هو، وغيَّرْنا تركيزَ أحادي أكسيدِ النيتروجينِ الابتدائيِّ. سنجدُ أن سرعةَ التفاعلِ الابتدائيَّةَ تزدادُ أربعةَ أمثالٍ لدى مضاعفةِ تركيزِ NO، وتصبحُ 9 أمثالِ السرعةِ الابتدائيَّةِ لدى زيادةِ تركيزِ NO إلى 3 أمثالِ التركيزِ الابتدائيِّ. لذلك، فإن سرعةَ التفاعلِ تتناسبُ طرديًّا مع مربَّعِ تركيزِ أحادي أكسيدِ النيتروجينِ، كما هو موضَّحٌ بالتناسبِ التالي:

$$R \propto [NO]^2$$

وحيثُ إن R يتناسبُ طرديًّا مع $[H_2]$ و $[NO]^2$ فإنه يتناسبُ طرديًّا مع حاصلِ ضربِهما أيضًا.

$$R \propto [H_2][NO]^2$$

وبوضعِ علامةِ المساواةِ، بدلاً من رمزِ التناسب، يُعتمَدُ ثابتُ تناسبٍ k فتصبحُ الصيغةُ بشكلِ معادلةٍ، كالتالي:

$$R = k[H_2][NO]^2$$

تسمَّى المعادلةُ التي تربطُ بين سرعةِ التفاعلِ وتركيزِ المتفاعلاتِ* قانونَ السرعةِ rate law *لذلك التفاعلِ. يطبَّقُ هذا القانونُ على تفاعلاتٍ معيَّنةٍ، عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، وإن أيَّ ارتفاعٍ في درجةِ الحرارةِ يزيدُ سرعةَ التفاعلِ في معظمِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ. تزدادُ قيمةُ k عادةً بارتفاعِ درجاتِ الحرارةِ، إلا أن العلاقةَ بين سرعةِ التفاعلِ والتركيزِ تبقى تقريبًا دون تغيُّرٍ بشكلٍ دائمٍ.

استخدامُ قانونِ السرعةِ

يمثِّلُ قانونُ سرعةِ التفاعلِ بشكلٍ عامٍّ بالمعادلةِ الرياضيَّةِ التاليةِ:

$$R = k[A]^n[B]^m$$

حيثُ يُرمزُ إلى سرعةِ التفاعلِ بـ R، ويرمزُ إلى ثابتِ السرعةِ النوعيَّةِ بـ k، ويمثِّلُ كلٌّ من $[A]$ و $[B]$ التركيزَينِ المولاريَّينِ للمتفاعلَينِ. وتتمثَّلُ الأسسُ التي يُرفعُ إليها التركيزانِ بـ n و m. وقانونُ السرعةِ قابلٌ للتطبيقِ في تفاعلاتٍ معيَّنةٍ تحت شروطٍ معيَّنةٍ ثابتةٍ، ويجبُ تحديدُهُ من خلالِ بياناتٍ عمليَّةٍ فقط.

الأسُّ الذي يُرفعُ إليه تركيزُ المتفاعلِ يسمَّى* الرتبةَ order *لذلك المتفاعلِ. فقيمةُ n هي رتبةُ المتفاعلِ A، فيقالُ عن التفاعلِ: إنه برتبةِ n في $[A]$. كما يقالُ عن قيمةِ الأسِّ m: إن التفاعلَ في $[B]$ هو برتبةِ m. تكونُ الرتبةُ أو الأسُّ (n أو m) إما عددًا صحيحًا صغيرًا أو صفرًا. ورتبةُ 1 للمتفاعلِ تعني أن سرعةَ التفاعلِ تتناسبُ طرديًّا مع تركيزِ ذلك المتفاعلِ. وإن رتبةَ 2 تعني أن سرعةَ التفاعلِ تتناسبُ طرديًّا مع مربَّعِ تركيزِ ذلك المتفاعلِ.

الكيمياءُ تطبيقيًّا

المتفجِّرات

في فترةٍ وجيزةٍ من الثانيةِ ينتهي التفاعلُ التفجيريُّ لمادَّةٍ مثل النيتروجليسيرين، أو ثلاثيِّ نيترو التولوين (TNT)، أو الديناميت. هذه الموادُّ هي في الأساسِ موادُّ عضويَّةٌ تحتوي غالبًا على ذرّاتِ الكربونِ والهيدروجينِ والأكسجينِ والنيتروجينِ مرتبطةً بروابطَ ضعيفةٍ نسبيًّا. ولدى حصولِ عمليَّةِ التفجيرِ تتعرَّضُ المادَّةُ المتفجرةُ إلى انحلالٍ سريعٍ جدًّا. وتتفاعلُ العناصرُ الناتجةُ فتكوِّنُ غازاتِ الـ N_2، CO، CO_2، NO_2 التي ترتبطُ جزيئاتُها الصغيرةُ بروابطَ أقوى من الروابطِ في مكوِّناتِ المادَّةِ الأصليَّةِ. وبذلك، تتحرَّرُ كمِّيَّةٌ هائلةٌ من الطاقةِ. بالإضافةِ إلى ذلك، يسبِّبُ التكوُّنُ المفاجئُ للغازاتِ زيادةً هائلةً في الضغطِ تشكِّلُ قوَّةً كبيرةً كافيةً لتدميرِ الأبنيةِ المرادِ إزالتُها، أو لتكسيرِ الصخورِ من أجلِ شقِّ الطرقِ وغيرِها.

وإن رتبةَ صفرٍ تعني أن السرعةَ لا تعتمدُ على تركيزِ المتفاعلِ. ويسمّى مجموعُ رتبِ المتفاعلات كلِّها رتبةَ التفاعلِ order of the reaction أو الرتبةَ الكلّيَّةَ overall order. فالرتبةُ الكلّيَّةُ للتفاعلِ تساوي مجموعَ رتبِ المتفاعلَين، أو $n + m$. وتجدُ فيما يلي بعضَ الأمثلةِ التي توضحُ قوانينَ السرعةِ. وهي قوانينُ تمَّ التوصُّلُ إليها من خلالِ التجاربِ. تتضمَّنُ بعض هذه التفاعلاتِ أكاسيدَ النيتروجين، وهي غازاتٌ نشطةٌ جدًّا تساهمُ في تكوين سُحُبِ الدخانِ الضبابيَّةِ التي تلفُّ سماءَ المدنِ الصناعيَّةِ، كما يظهرُ في الشكل 10-6.

$3NO(g) \rightarrow N_2O(g) + NO_2(g)$ $\qquad R = k[NO]^2$

رتبةٌ ثانيةٌ في NO،
رتبةٌ كلّيَّةٌ ثانيةٌ

$NO_2(g) + CO(g) \rightarrow NO(g) + CO_2(g)$ $\qquad R = k[NO_2]^2$

رتبةٌ ثانيةٌ في NO_2،
رتبةٌ صفرٌ في CO،
رتبةٌ كلّيَّةٌ ثانيةٌ

$2NO_2(g) \rightarrow 2NO(g) + O_2(g)$ $\qquad R = k[NO_2]^2$

رتبةٌ ثانيةٌ في NO_2،
رتبةٌ كلّيَّةٌ ثانيةٌ

$2H_2O_2(aq) \rightarrow 2H_2O(l) + O_2(g)$ $\qquad R = k[H_2O_2]$

رتبةٌ أولى في H_2O_2،
رتبةٌ كلّيَّةٌ أولى

الشكل 10-6 سُحُبٌ من الهواءِ الملوَّثِ، تُعرفُ بالضَّبَخان (ضباب + دخان) تلفُّ سماءَ المدينةِ. الضَّبَخانُ شائعٌ في المناطقِ الصناعيَّةِ، حيث تُطلَقُ في الهواءِ غازاتٌ ودقائقُ جسيميَّةٌ عاليةُ النشاطيَّةِ.

من المهمِّ أن تعرفَ أن الرتبَ في قانونِ السرعةِ قد تطابقُ المعاملاتِ في المعادلةِ الموزونةِ وقد لا تطابقُها. يجبُ تحديدُ هذه الرتبِ من بياناتِ التجربةِ العمليَّةِ.

ثابتُ السرعةِ النوعيَّةِ

إن ثابتَ السرعةِ النوعيَّةِ (k) هو ثابتُ التناسبِ الذي يربطُ سرعةَ تفاعلٍ معيَّنٍ بتركيزِ المتفاعلاتِ. ومن المهمِّ تذكُّرُ ما يلي حول قيمِ k:

1. عند معرفةِ رتبِ (أسس) التفاعلِ، يجبُ تحديدُ قيمةِ k من بياناتِ التجربةِ العمليَّةِ.
2. إن قيمةَ k خاصةٌ بتفاعلٍ معيَّنٍ، و k لها قيمٌ مختلفةٌ في تفاعلاتٍ أخرى، حتى وإن أُجريَتْ تحت الشروطِ نفسِها.
3. تعتمدُ وحدةُ k على الرتبةِ الكلّيَّةِ للتفاعلِ.
4. لا تتغيَّرُ قيمةُ k بتغيُّرِ قيمِ تراكيزِ المتفاعلاتِ أو النواتجِ. لذلك، تبقى قيمةُ k لذلك التفاعلِ دون تغييرٍ خلالَ التفاعلِ، ولا تتغيَّرُ مع الوقتِ.
5. تحدَّدُ قيمةُ k للتفاعلِ عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ. فإذا ارتفعَتْ درجةُ حرارةِ التفاعلِ تزدادُ قيمةُ k.
6. إن قيمةَ k تتغيَّرُ (تصبحُ أكبرَ) بوجودِ الحفازِ.

مسألةٌ نموذجية 2-6

لقياسِ السرعةِ الابتدائيَّةِ للتفاعلِ التالي أُجريَتْ ثلاثُ تجاربَ مختبريَّةٍ تحت شروطٍ متماثلةٍ.

$$2HI(g) \rightarrow H_2(g) + I_2(g)$$

وكانت نتائجُ التجاربِ الثلاثِ كالتالي:

التجربة	[HI](M)	السرعة (M/s)
1	0.015	1.1×10^{-3}
2	0.030	4.4×10^{-3}
3	0.045	9.9×10^{-3}

اكتبْ قانونَ سرعةِ التفاعلِ. جدْ قيمةَ ثابتِ السرعةِ النوعيَّةِ ووحداتِه.

الحلّ

1 حلِّلْ إن صيغةَ قانونِ السرعةِ العامِّ لهذا التفاعلِ هي $R = k[HI]^n$. يلزمُنا أن نستنتجَ قيمةَ الأسِّ n.

2 خطِّطْ جدْ نسبةَ تركيزَي المتفاعلِ بين تجربتَين، مثل 1 و 2، $\frac{[HI]_2}{[HI]_1}$. ثم جدْ كيف تؤثِّرُ نسبةُ التركيزِ على نسبةِ السرعة، $\frac{R_2}{R_1}$.

3 احسبْ نسبةُ التركيزِ: $\frac{[HI]_2}{[HI]_1} = \frac{0.030\ M}{0.015\ M} = 2.0$، نسبةُ السرعةِ: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{4.4 \times 10^{-3}\ M/s}{1.1 \times 10^{-3}\ M/s} = 4.0$

لذلك، عندما يتضاعفُ التركيزُ (يُضرَبُ في المعاملِ 2) تزدادُ السرعةُ إلى 4 أمثالٍ (يُضرَبُ في المعاملِ 4)، أو 2^2. فيصبحُ القانونُ $R = k[HI]^2$.

لإيجادِ قيمةِ k، يمكنُنا إعادةُ ترتيبِ قانونِ السرعةِ وتعويضُ القيمِ المعلومةِ لأيِّ تجربةٍ من التجاربِ. عوِّض وفقًا للقيمِ في التجربةِ 1:

$$k = \frac{R}{[HI]^2} = \frac{1.1 \times 10^{-3}\ M/s}{(0.015\ M)^2} = 4.9\ M^{-1}s^{-1}$$

4 قيِّمْ بمقارنةِ التجربتَين 1 و 3 في الجدول، نرى أنه عند تضاعفِ [HI] إلى ثلاثةِ أمثالِ القيمةِ الابتدائيَّةِ تزدادُ السرعةُ إلى تسعةِ أمثالِ السرعةِ الابتدائيَّةِ أي 3^2. يؤكِّدُ هذا التغيُّرُ في السرعةِ أن الرتبةَ هي 2. يمكنُ حسابُ قيمةِ k نفسِها من أيِّ تجربةٍ أخرى. فلذلك يكونُ قانونُ السرعةِ وقيمةُ k صحيحَيْن.

تمارينُ تطبيقية

1. في التفاعلِ $3A \rightarrow C$ كان التركيزُ الابتدائيُّ لـ A يساوي 0.2 M وسرعةُ التفاعلِ 1.0 M/s. وبمضاعفةِ [A] ازدادَتْ سرعةُ التفاعلِ بمقدارِ 4.0 M/s. حدِّدْ قانونَ السرعةِ للتفاعلِ.

2. وُجدَ أن قانونَ سرعةِ تفاعلٍ معيَّنٍ هو $R = k[X]^3$. ما المعاملُ الذي تزدادُ بموجبِه السرعةُ، علمًا أن [X] قد تضاعفَ إلى ثلاثةِ أمثالِ التركيزِ الابتدائيِّ؟

الجواب

1. السرعة = $k[A]^2$

2. 27

مسألةٌ نموذجية 3-6

أُجريَتْ ثلاثُ تجاربَ عمليَّةٍ لقياسِ السرعةِ الابتدائيَّةِ للتفاعل.

$$A + B \rightarrow C$$

كانتِ الظروفُ متماثلةً في التجاربِ الثلاث، باستثناءِ تراكيزِ المتفاعلاتِ التي كانتْ متغيِّرةً. والنتائجُ كانتْ كما يلي:

التجربة	[A](M)	[B](M)	السرعة (M/s)
1	1.2	2.4	8.0×10^{-8}
2	1.2	1.2	4.0×10^{-8}
3	3.6	2.4	7.2×10^{-7}

اكتبْ قانونَ السرعةِ للتفاعل، ثم جدْ قيمةَ ثابتِ السرعةِ النوعيَّةِ ووحداتِه.

الحلّ

1 حلِّلْ إن صيغةَ قانونِ السرعةِ العامِّ لهذا التفاعلِ هي $R = k[A]^n[B]^m$. نحتاجُ أن نستنتجَ قيمتَي الأسَّيْنِ n و m.

2 خطِّطْ جدْ نسبةَ تركيزَي المتفاعلَين في التجربتَين اللتينِ لهما [A] نفسُها و [B] مختلفةٌ. ثم جدْ كيف تؤثِّرُ هذه النسبةُ في نسبةِ السرعةِ $\frac{R_1}{R_2}$، ومن نسبةِ السرعةِ هذه يمكنُنا إيجادُ قيمةِ m. وبطريقةٍ مماثلةٍ لمقارنةِ التجربتَين اللتَين لهما [B] نفسُها و [A] مختلفة يمكنُنا إيجادُ قيمةِ n.

3 احسبْ أولاً: قارنِ التجربتَين 1 و 2 اللتينِ تشتركانِ في [A] نفسِها لإيجادِ قيمةِ m:

نسبةُ التركيزِ: $\frac{[B]_1}{[B]_2} = \frac{2.4\ M}{1.2\ M} = 2.0$، نسبةُ السرعةِ: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{8.0 \times 10^{-8}\ M/s}{4.0 \times 10^{-8}\ M/s} = 2.0$

لذلك، عندما يتغيَّرُ تركيزُ B بمعاملِ 2، تتغيَّرُ االسرعةُ بمعاملِ 2، أو 2^1، لذا $m = 1$، والتفاعلُ هو من الرتبةِ الأولى في B.

ثم قارنِ التجربتَين 1 و 3 اللتينِ تشتركانِ في [B] نفسِها لإيجادِ قيمةِ n:

نسبةُ التركيزِ: $\frac{[A]_3}{[A]_1} = \frac{3.6\ M}{1.2\ M} = 3.0$، نسبةُ السرعةِ: $\frac{R_3}{R_1} = \frac{7.2 \times 10^{-7}\ M/s}{8.0 \times 10^{-8}\ M/s} = 9.0$

لذلك، عندما يتغيَّرُ تركيزُ A بمعامل 3، تتغيَّرُ السرعةُ بمعاملِ 9 أي 3^2. لذلك $n = 2$. والتفاعلُ هو من الرتبةِ الثانيةِ في A. يصبحُ قانونُ السرعةِ $R = k[A]^2[B]$.

لإيجادِ قيمةِ k، يمكنُنا إعادةُ ترتيبِ قانونِ السرعةِ وتعويضُ القيمِ المعلومةِ لأيٍّ من التجارب. عوِّضْ وفقًا للقيمِ في التجربةِ 1:

$$k = \frac{R}{[A]^2[B]} = \frac{8.0 \times 10^{-8}\ M/s}{(1.2\ M)^2(2.4\ M)} = 2.3 \times 10^{-8}\ M^{-2}s^{-1}$$

4 قيِّمْ يمكنُ حسابُ قيمةِ k نفسِها من بياناتِ أيِّ تجربةٍ أخرى. إن قانونَ السرعةِ وقيمةَ k صحيحان.

قوانينُ السرعةِ ومسارُ التفاعلِ

تعتمدُ معادلةُ قانونِ السرعةِ على آليَّةِ التفاعلِ. وبالنسبةِ للتفاعلِ الذي يحدثُ في خطوةٍ واحدةٍ تتناسبُ سرعةُ التفاعلِ في هذه الخطوةِ طرديًّا مع ناتجِ ضربِ تراكيزِ المتفاعلاتِ لذلك التفاعلِ، حيث يُرفَعُ كلٌّ من التراكيزِ إلى معاملِ المتفاعلاتِ، stoichiometric coefficient. افترضْ، على سبيلِ المثالِ، أن جزيئًا واحدًا من الغازِ A تصادمَ مع جزيءٍ من الغازِ B، فكوّنا جزيئينِ من المادةِ الغازيةِ C، وفقًا للمعادلةِ التاليةِ:

$$A + B \leftrightarrows 2C$$

يفيدُ ذلك أن جسيمًا واحدًا من كلِّ متفاعلٍ اشتركَ في كلِّ تصادمٍ. لهذا تؤدّي مضاعفةُ تركيزِ كلٍّ من المتفاعلَينِ إلى مضاعفةِ سرعةِ التصادمِ. وستتضاعفُ كذلك سرعةُ التفاعلِ لهذه الخطوةِ. لذا تتناسبُ سرعةُ التفاعلِ لهذه الخطوة تناسبًا طرديًّا مع تركيزَيْ A و B. فيكونُ قانونُ السرعةِ للتفاعلِ الأماميِّ:

$$R_{\text{أمامي}} = k_{\text{أمامي}}[A][B]$$

لنفترضِ الآن أن التفاعلَ انعكاسيٌّ. في الخطوةِ العكسيَّةِ يجبُ أن يتفكَّكَ جزيئا C لتكوينِ الجزيئينِ A و B، أو $2C \rightarrow A + B$.

لذلك، فإن سرعةَ التفاعلِ العكسيِّ هذه تتناسبُ طرديًّا مع $[C] \times [C]$ ويصبحُ قانونُ السرعةِ للتفاعلِ العكسيِّ كالتالي: $R_{\text{عكسي}} = k_{\text{عكسي}}[C]^2$

الأسُّ الذي يُرفعُ إليه التركيزُ المولاريُّ لكلِّ متفاعلٍ في قانونِ السرعةِ السابقِ يطابقُ أو يساوي معاملَ المتفاعلِ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ. وتبقى هذه العلاقةُ واردةً ما دامَ التفاعلُ يتبعُ مسارًا من خطوةٍ واحدةٍ. وهذا يعني أن التفاعلَ يحدثُ في المستوى الجزيئيِّ، تمامًا كما هو مكتوبٌ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ.

أما إذا سلكَ التفاعلُ الكيميائيُّ مسارًا من عدَّةِ خطواتٍ، فقانونُ السرعةِ ستحدِّدُهُ الخطوةُ الأبطأ، لأن سرعةَ التفاعلِ فيها هي الأقلُّ. ***خطوةُ السرعةِ الأبطأ تسمَّى الخطوةَ المحدِّدةَ لسرعةِ التفاعلِ* rate-determining step**.

تأمَّلْ تفاعلَ ثنائي أكسيدِ النيتروجينِ مع أحادي أكسيدِ الكربونِ:

$$NO_2(g) + CO(g) \rightarrow NO(g) + CO_2(g)$$

يعتقدُ أن هذا التفاعلَ هو عمليَّةٌ ذاتُ خطوتَينِ، وتتمثَّلُ بالآليَّةِ التاليةِ:

الخطوةُ 1: $NO_2 + NO_2 \rightarrow NO_3 + NO$ بطيء

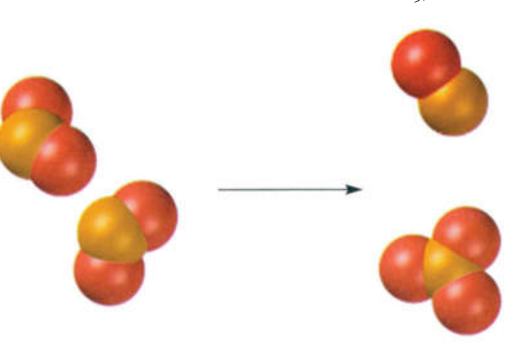
الخطوةُ 2: $NO_3 + CO \rightarrow NO_2 + CO_2$ سريع

الشكل 6-11 يمثِّلُ هذا الرسمُ الخطوةَ الأولى لتفاعلِ ثنائي أكسيدِ النيتروجينِ مع أحادي أكسيدِ الكربونِ. لاحظْ تكوينَ المركَّبِ الوسيطِ NO_3 بعد تصادمِ جزيئَينِ من NO_2.

في الخطوةِ الأولى، المبيَّنةِ في الشكل 6-11، يتصادمُ جزيئانِ من NO_2 لتكوينِ المركَّبِ الوسيطِ NO_3. يتصادمُ هذا الجزيءُ بدورِهِ مع جزيءِ CO فيتفاعلانِ بسرعةٍ لتكوينِ جزيءٍ واحدٍ من كلٍّ من NO_2 و CO_2. تكونُ الخطوةُ الأولى أبطأ الخطوتَينِ، وتكونُ بذلك الخطوةَ المحدِّدةَ للسرعةِ. ويمكنُنا كتابةُ قانونِ السرعةِ من هذه الخطوةِ التي لها جزيئانِ من NO_2 كمتفاعلَينِ.

$$R = k[NO_2]^2$$

لا يشملُ قانونُ السرعةِ [CO]، لأن CO يتفاعلُ بعد الخطوةِ المحدِّدةِ للسرعةِ، ولا يؤثِّرُ في السرعةِ.


$2NO_2 \rightarrow NO_3 + NO$

مسألةٌ نموذجية 6-4

يتفاعلُ غازُ ثنائي أكسيدِ النيتروجينِ مع غازِ الفلورِ وفقًا للمعادلةِ التالية:

$$2NO_2(g) + F_2(g) \rightarrow 2NO_2F(g)$$

والآليَّةُ المفترضةُ لهذا التفاعلِ هي:

الخطوةُ 1: $NO_2 + F_2 \rightarrow NO_2F + F$ (بطيء)

الخطوةُ 2: $F + NO_2 \rightarrow NO_2F$ (سريع)

عيّنِ الخطوةَ المحدِّدةَ للسرعةِ واكتبْ قانونَ السرعةِ الملائمَ.

الحلّ

إذا جمعنا هاتينِ الخطوتَينِ يُحذفُ المركَّبُ الوسيطُ، F، وتبقى المعادلةُ الأصليَّةُ. الخطوةُ الأولى هي الخطوةُ الأبطأ، وتعتبرُ الخطوةَ المحدِّدةَ للسرعةِ. يمكنُنا الآنَ كتابةُ قانونِ السرعةِ من هذه الخطوةِ.

$$R = k[NO_2][F_2]$$

مسألةٌ نموذجية 6-5

يحدثُ تفاعلٌ بين المتفاعلَينِ X و Y بآليَّةِ الخطوةِ الواحدة:

$$X + 2Y \rightarrow XY_2$$

اكتبْ قانونَ سرعةِ هذا التفاعلِ، ثم حدِّدْ تأثيرَ كلٍّ مما يلي في سرعةِ التفاعلِ:

أ. مضاعفةِ تركيزِ X

ب. مضاعفةِ تركيزِ Y

ج. استخدامِ ثلثِ تركيزِ Y

الحلّ

بما أن المعادلةَ تمثِّلُ آليَّةَ الخطوةِ الواحدةِ، فإنه يمكنُ كتابةُ قانونِ السرعةِ من المعادلةِ (وإلا تعذَّرَتْ كتابتُه). تتناسبُ السرعةُ طرديًّا مع تركيزِ X، المتفاعلِ ذي المعاملِ 1 في المعادلةِ. كما أن السرعةَ ستتناسبُ طرديًّا مع مربَّعِ تركيزِ Y ذي المعاملِ 2 في المعادلةِ، $R = k[X][Y]^2$.

أ. مضاعفةُ تركيزِ X تضاعفُ السرعةَ ($R = k[2X][Y]^2$).

ب. مضاعفةُ تركيزِ Y تضاعفُ السرعةَ إلى أربعةِ أمثالِها ($R = k[X][2Y]^2$).

ج. استخدامُ ثلثِ تركيزِ Y يقلِّلُ السرعةَ إلى تسعِ قيمتِها الابتدائيَّةِ ($R = k[X][\frac{1}{3}Y]^2$).

تمارينُ تطبيقية

1. وُجِدَ أن سرعةَ التفاعلِ الافتراضيِّ بين L و M تتضاعفُ لدى مضاعفةِ تركيزِ L، وتزدادُ إلى 4 أمثالِها لدى مضاعفةِ تركيزِ M. اكتبْ قانونَ سرعةِ هذا التفاعلِ.

2. عند درجةِ حرارةٍ أقلَّ من 498 K، يحدثُ التفاعلُ التالي:

$$NO_2(g) + CO(g) \rightarrow CO_2(g) + NO(g)$$

مضاعفةُ تركيزِ NO_2 تزيدُ سرعةَ تكوينِ CO_2 إلى أربعةِ أمثالِ السرعةِ الابتدائيَّةِ، إذا بقيَ تركيزُ CO ثابتًا. لكنَّ مضاعفةَ تركيزِ CO ليستْ ذاتَ تأثيرٍ في سرعةِ تكوينِ CO_2. اكتبْ قانونَ سرعةِ هذا التفاعلِ.

الجواب

1. $R = k[L][M]^2$

2. $R = k[NO_2]^2$

نشاط عملي سريع

العواملُ المؤثِّرةُ في سرعةِ التفاعلِ

ضع النظّارةَ الواقيةَ والمريولَ

المواد

- لهبُ بنزن
- رمادُ الورق
- شريطٌ رقيقٌ من النحاس
- مخبارٌ مدرَّجٌ سعة 10 mL
- شريطُ مغنيسيومَ
- عودُ ثقاب
- مشبكُ ورقٍ
- ورقُ تنعيم
- صوفُ حديدٍ (سلكُ الجلي)
- مكعَّبان من السكَّر
- خلٌّ أبيضُ
- شريطُ خارصين
- 6 أنابيبُ اختبارٍ 16×150 mm
- ملاقطُ

السؤال

كيف تؤثِّرُ أنواعُ المتفاعلاتِ ومساحتُها السطحيَّةُ وتركيزُها ووجودُ الحفّازاتِ في سرعةِ التفاعلِ؟

الطريقة

أزلْ جميعَ الموادِّ القابلةِ للاشتعالِ من منطقةِ العمل. ضع النظّارةَ الواقيةَ والبسْ مريولَ المختبرِ. سجِّلْ نتائجَكَ في جدول البيانات.

1. أضفْ 10 mL من الخلِّ إلى كلٍّ من أنابيبِ الاختبارِ الثلاثةِ. أضفْ إلى أحدِ هذه الأنابيبِ قطعةً من شريطِ المغنيسيومِ طولُها 3 cm. أضفْ إلى الأنبوبِ الثاني قطعةً من شريطِ الخارصينِ طولُها 3 cm. وأضفْ إلى الأنبوبِ الثالثِ قطعةً من شريطِ النحاس طولُها 3 cm. (تأكدْ من أن هذه الأشرطةَ لها العرضُ نفسُه) وإذا لزمَ الأمرُ، نظِّفْ هذه الأشرطةَ بحكِّها بورقِ تنعيمٍ حتى تلمعَ.
2. استخدمِ الملقطَ لتمسكَ مشبكَ الورقِ. عرِّضِ المشبكَ للهبِ بنزن لمدَّةِ 30 ثانيةً. كررْ ذلك مستخدمًا كرةً من سلكِ الجلْي قطرُها 2 cm.
3. أضفْ إلى الأنبوبِ الأوّلِ 10 mL من الخلِّ، وأضفْ إلى الثاني 5 mL من الخلِّ مع 5 mL من الماءِ، وأضفْ إلى الأنبوبِ الثالثِ 2.5 mL من الخلِّ و 7.5 mL من الماءِ. أضفْ إلى كلٍّ من الأنابيبِ الثلاثةِ قطعةً من شريطِ المغنيسيومِ طولُها 3 cm.
4. استخدمِ الملقطَ لتمسكَ مكعَّبَ سكَّرٍ. حاولْ إشعالَ المكعَّبِ بعودِ ثقابٍ. ثم حاولْ إشعالَهُ باستخدامِ لهبِ بنزن. افركْ برمادِ الورقِ مكعَّبًا ثانيًا، ثم حاولْ إشعالَهُ بعودِ ثقابٍ.

المناقشة

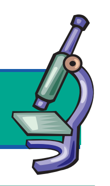
1. ما العواملُ المؤثِّرةُ في السرعةِ، في كلِّ خطوةٍ من خطواتِ طريقةِ العمل؟
2. ما النتائجُ التي نجمتْ عن كلِّ خطوةٍ؟ وكيف تفسِّرُ كلَّ نتيجةٍ؟

مراجعةُ القسم 2-6

1. ماذا يُدرَّسُ في فرعِ الكيمياءِ المسمّى الكيمياءَ الحركيَّةَ؟
2. ما العواملُ التي تؤثِّرُ في سرعةِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ؟
3. ما الحفّازُ؟ وضِّحْ تأثيرَ الحفّازِ في سرعةِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ. كيف يؤثِّرُ الحفّازُ في طاقةِ التنشيطِ اللازمةِ لحدوثِ تفاعلٍ كيميائيٍّ معيَّنٍ؟
4. ما المقصودُ بقانونِ السرعةِ لتفاعلٍ كيميائيٍّ؟ وضِّحِ الشروطَ التي يُكتبُ بناءً عليها قانونُ السرعةِ من المعادلةِ الكيميائيَّةِ.

تفكيرٌ ناقد

5. **ربطُ أفكار:** مستخدمًا أفكارَ الكيمياءِ الحركيَّةِ، فسِّرِ الغرضَ من تبريدِ الطعامِ.



قراءةٌ علميَّةٌ

المحوِّلاتُ الحفّازةُ

قد لا تحتاجُ إلى النظرِ أبعدَ من الطريقِ التي بجوارِ بيتِك لتلاحظَ مثالاً حيًّا على عمليَّةِ الحفزِ غيرِ المتجانسة. فالمحوِّلُ الحفّازُ هو جزءٌ مهمٌّ من نظامِ الطردِ في المركباتِ التي تستخدمُ الحفّازاتِ المعدنيَّةَ لاختزالِ الملوِّثاتِ الغازيَّةِ الضارة.

في محرِّكِ السيارة، تتعرَّضُ جزيئاتُ الهيدروكربون في الجازولين أو في وقودِ الديزل إلى تفاعلِ احتراقٍ مع أكسجينِ الهواءِ لتكوينِ ثنائي أكسيدِ الكربونِ، CO_2، وبخارِ الماءِ. ويلزمُ هنا ضبطُ النسبةِ الاتحاديَّةِ الصحيحةِ بين الوقودِ والأكسجينِ كي يحترقَ الوقودُ بشكلٍ تامٍّ في التفاعل. وتتكوَّنُ نواتجُ تفاعلٍ إضافيَّةٌ عندما لا يتوافرُ ما يكفي من الأكسجينِ أو فائضٌ منه. ومن هذه النواتجِ أحادي أكسيدِ الكربونِ، CO، ومركَّباتُ NO_x من أمثالِ أحادي أكسيدِ النيتروجين، NO، وثنائي أكسيدِ النيتروجين، NO_2، وهنالك أيضًا بقيَّةٌ من وقودٍ غيرِ محترقٍ يُعرفُ بالمركَّباتِ العضويَّةِ المتطايرةِ (VOC).

تنظِّمُ اتفاقيَّةُ الهواءِ النظيفِ، المبرمةُ عام 1995، انبعاثاتِ مركَّباتِ CO و NO_x و VOCs. ومن دونِ المحوِّلِ الحفّازِ تبعثُ السيارةُ جميعَ النواتجِ الثانويَّةِ الناتجةِ عن الاحتراقِ غيرِ التامِّ إلى الجوِّ. وعدا كونِ هذه الموادِّ ضارةً فإن مركَّباتِ NO_x و CO و VOCs تتفاعلُ مع ضوءِ الشمسِ لتكوينِ الأوزونِ O_3. وفي طبقاتِ الجوِّ السفلى يشكِّلُ الأوزونُ الجزءَ الأكبرَ من الضَّبَخانِ. ويمكنُ أن تختلطَ غازاتُ NO_x أيضًا بماءِ المطرِ لتكوينِ الأمطارِ الحمضيَّةِ.

تستخدمُ المحوِّلاتُ الحفّازةُ معادنَ ثمينةً كحفّازاتٍ لتغييرِ الغازاتِ المطرودةِ من المحرِّكِ وتحويلِها إلى غازاتٍ أقلَّ ضررًا. فمزيجٌ من الروديومِ والبلاتينِ وأحيانًا البلاديومِ يُستخدَمُ لتحويلِ مركَّباتِ النيتروجين NO_x إلى النيتروجين N_2 و O_2. يحوِّلُ هذا المزيجُ أيضًا CO إلى CO_2، ويحوِّلُ VOCs إلى CO_2 وماءٍ. يحتاجُ الحفّازُ إلى O_2 من الهواءِ ودرجةِ حرارةٍ تزيدُ عن 260°C لكي يعملَ بكفاءةٍ. ويحصُلُ على الحرارةِ من عملِ المحرِّكِ العاديِّ. ولكن، إلى أن تصلَ حرارةُ المحرِّكِ إلى درجةِ الحرارةِ الملائمةِ لعملِ الحفّازِ، يُطلِقُ عادمُ السيارةِ CO، و NO_x، و VOCs في الهواءِ دون تغيير.

يتألَّفُ التركيبُ الداخليُّ للمحوِّلِ الحفزيِّ عادةً من هيكلٍ خزفيٍّ شبيهٍ بقرصِ العسلِ، مغلفٍ بطبقةٍ من جسيماتِ معدنٍ حفزيٍّ. للتركيبِ المشابهِ لقرصِ العسلِ هذا عدةُ ثقوبٍ يمرُّ الغازُ من خلالِها، وذلك لتوفيرِ مساحةٍ سطحيَّةٍ كبيرةٍ لامتزازِ العناصرِ فوقَه. والمساحةُ السطحيَّةُ الكبيرةُ ضروريَّةٌ أيضًا لزيادةِ التفاعلاتِ الحفزيَّةِ إلى الحدِّ الأقصى، حيث تنشطُ عمليَّةُ الحفزِ غيرِ المتجانس، ولأنَّ تحوُّلَ جزيئاتِ الغازِ يحصلُ على سطحِ المعدنِ.

يُعتقدُ أن ما مقدارُهُ 90% من CO و NOx و VOCs تُزالُ من عادمِ السيارةِ بواسطةِ المحوِّلِ الحفزيِّ. وعلى الرغمِ من أن المحوِّلَ الحفزيَّ مفيدٌ لمحيطِنا وبيئتِنا إلا أنه لا يزالُ يحتاجُ إلى تحسيناتٍ، من أهمِّها إمكانيَّةُ تعديلِ الحفّازِ بحيثُ يعملُ عند درجاتِ الحرارةِ المنخفضةِ، وبذلك يتمُّ اختزالُ انبعاثِ الغازاتِ الضارَّةِ التي تصدرُ عن المحرِّكِ خلالَ الدقائقِ الأولى من تشغيلِهِ. وهنالك غازاتٌ أخرى تنبعثُ من السيّارةِ قد تشكِّلُ خطورةً على البيئةِ والصحَّةِ، منها غازُ أكسيدِ النيتروزِ N_2O، الذي يتكوَّنُ نتيجةَ الاختزالِ غيرِ الكاملِ لـ NO_x في المحوِّلِ الحفزيِّ. وعلى عكسِ NO_x، يمكنُ لغازِ N_2O، أن ينتقلَ إلى الأجواءِ العليا حيث يمكنُ أن يدمِّرَ طبقةَ الأوزونِ. و N_2O يعملُ كأحدِ غازاتِ الدفيئةِ، وهو أكثرُ فاعليَّةً من CO_2 بـ 300 مرَّةٍ.

نوعٌ من المحوِّلاتِ الحفّازةِ المستخدَمَةِ في السيّارات. تمَّ قطعُ جُزءٍ من المحوِّلِ لإظهارِ مادَّةِ السيراميكِ المساميَّةِ التي تعملُ كأساسٍ للحفّاز.

أسئلة

1. لماذا يستخدمُ الحفّازُ غيرُ المتجانس بديلاً للحفازِ المتجانسِ في المحوِّلِ الحفزيِّ؟
2. لغازِ أكسيدِ النيتروزِ N_2O، في الواقع، استخداماتٌ مفيدةٌ على الرغمِ من دورِهِ كأحدِ غازاتِ الدفيئةِ. هل يمكنُكَ أن تسمِّيَ أحدَ استخداماتِ N_2O المفيدةِ؟

مراجعةُ الفصل 6

ملخّصُ الفصل

1-6

- تسمّى سلسلةُ الخطواتِ التي يجري فيها التفاعلُ الكيميائيُّ آليَّةَ التفاعل.
- لحدوثِ تفاعلٍ كيميائيٍّ يجبُ أن تتصادمَ جسيماتُ المتفاعلات.
- إن طاقةَ التنشيطِ ضروريَّةٌ لدمجِ إلكتروناتِ التكافؤ ولإضعافِ الروابطِ بما يكفي لتفاعلِ الجزيئاتِ.
- يتكونُ المعقَّدُ المنشَّطُ عندما ترفعُ التصادماتُ الفعّالةُ بين جزيئاتِ المتفاعلاتِ الطاقةَ الداخليَّةَ إلى الحدِّ الأدنى الملائمِ لحدوثِ التفاعلِ.

المفردات

- آليَّةُ التفاعلِ reaction mechanism (153)
- الوسيطُ intermediate (154)
- التفاعلُ المتجانسُ homogeneous reaction (154)
- نظريَّةُ التصادمِ collision theory (154)
- طاقةُ التنشيطِ activation energy (156)
- المعقَّدُ المنشَّطُ activated complex (157)

2-6

- تتأثرُ سرعةُ التفاعلِ بالعواملِ التاليةِ: طبيعةُ المتفاعلاتِ، المساحةُ السطحيَّةُ، درجةُ الحرارةِ، تركيزُ المتفاعلاتِ، وجودُ الحفّازِ.
- يمكنُ قياسُ سرعةِ حدوثِ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ أحيانًا بطرقٍ عمليَّةٍ، ويعبَّرُ عنها بعلاقاتٍ رياضيَّةٍ تسمّى قوانينَ السرعةِ.
- تعتمدُ سرعةُ التفاعلِ على التركيزِ، وهو ما يحدِّدُ قوانينَ السرعةِ.

المفردات

- سرعةُ التفاعلِ reaction rate (160)
- الكيمياءُ الحركيَّةُ chemical kinetics (160)
- التفاعلُ غيرُ المتجانسِ heterogeneous reaction (160)
- الحفّازُ catalyst (162)
- التحفيزُ catalysis (162)
- الحفّازُ المتجانسُ homogeneous catalyst (162)
- الحفّازُ غيرُ المتجانسِ heterogeneous catalyst (162)
- قانونُ السرعةِ rate law (164)
- الرتبةُ order (164)
- الخطوةُ المحدِّدةُ للسرعةِ rate-determining step (168)

اختيارٌ من متعدِّد

1. يسمّى تسلسلُ الخطواتِ التي تقعُ في عمليَّةِ تفاعلٍ
   أ. رتبةَ التفاعل.
   ب. قانونَ السرعة.
   ج. التفاعلَ الكليَّ.
   د. آليَّةَ التفاعل.

2. لكي يكونَ التصادمُ فعّالاً، يلزمُه أن يكونَ
   أ. ذا طاقةٍ كافيةٍ فقط.
   ب. ذا اتِّجاهٍ مناسبٍ فقط.
   ج. ذا طاقةٍ واتِّجاهٍ مناسبَين.
   د. ذا آليَّةِ تفاعلٍ.

3. كيف تقارنُ طاقةَ المعقَّدِ المنشّطِ بطاقاتِ المتفاعلاتِ والنواتج؟
   أ. تكونُ أقلَّ من كلتا طاقتَي المتفاعلاتِ والنواتج.
   ب. تكونُ أقلَّ من طاقةِ المتفاعلات، لكن أكبرَ من طاقةِ النواتج.
   ج. تكونُ أكبرَ من طاقةِ المتفاعلات، لكن أقلَّ من طاقةِ النواتج.
   د. تكونُ أكبرَ من طاقةِ المتفاعلاتِ ومن طاقةِ النواتج.

4. إذا كان التصادمُ بين الجزيئاتِ ضعيفًا، تكونُ الجزيئاتُ
   أ. في الاتِّجاهِ المناسب.
   ب. في الاتِّجاهِ غيرِ المناسب.
   ج. قابلةً للتفاعل.
   د. قابلةً للارتدادِ دون تفاعل.

5. الأنواعُ التي تغيِّرُ سرعةَ تفاعلٍ دون أن تُستهلَكَ أو تتغيَّرَ هي
   أ. حفّاز.
   ب. معقَّدٌ منشَّطٌ.
   ج. مركّبٌ وسيطٌ.
   د. متفاعل.

6. يربطُ قانونُ السرعةِ بين
   أ. سرعةِ التفاعلِ ودرجةِ الحرارة.
   ب. سرعةِ التفاعلِ والتركيز.
   ج. درجةِ الحرارةِ والتركيز.
   د. الطاقةِ والتركيز.

7. في الشكلِ البيانيِّ الذي يوضحُ تغيُّرَ الطاقةِ مع سيرِ التفاعلِ، يظهرُ المعقَّدُ المنشّطُ في:
   أ. يسارِ نهايةِ المنحنى.
   ب. يمينِ نهايةِ المنحنى.
   ج. أسفلِ المنحنى.
   د. قمةِ المنحنى.

8. تسمى الخطوةُ الأبطأُ في الآليَّةِ
   أ. الخطوةَ المحدِّدةَ للسرعة.
   ب. التفاعلَ غيرَ المحفّز.
   ج. خطوةَ التنشيط.
   د. لا شيء مما ذُكِر.

9. تفاعلٌ معيَّنٌ رتبتُهُ صفرٌ في المتفاعلِ A، ورتبتُهُ ثانيةٌ في المتفاعلِ B، فما الذي يحصلُ لسرعةِ التفاعلِ عندما يتضاعفُ تركيزا كلٍّ من المتفاعلَين A و B؟
   أ. تبقى سرعةُ التفاعلِ هي نفسَها.
   ب. يزدادُ التفاعلُ بمعاملٍ مقدارُهُ 2.
   ج. تزدادُ سرعةُ التفاعلِ بمعاملٍ مقدارُهُ 4.
   د. تزدادُ سرعةُ التفاعلِ بمعاملٍ مقدارُهُ 8.

مراجعةُ المفاهيم

10. أ. ما المقصودُ بنظريَّةِ التصادم؟
    ب. وفقًا لهذه النظريَّةِ، ما الشرطانِ اللذانِ يجبُ توافرُهما لتكونَ التصادماتُ بين جزيئاتِ المتفاعلاتِ فعّالةً في إنتاجِ أنواعٍ كيميائيَّةٍ جديدة؟

11. أ. ما الشرطُ الواجبُ توافرُهُ لتكوينِ معقَّدٍ منشَّطٍ من تصادمِ جسيماتِ المتفاعل؟
    ب. أين يقعُ المعقَّدُ المنشَّطُ، بدلالةِ الطاقةِ، على امتدادِ مسارِ التفاعل؟

12. في التفاعلاتِ الانعكاسيَّةِ قارنْ بين طاقةِ التنشيطِ اللازمةِ للتغيُّرِ الطاردِ للحرارةِ وطاقةِ التنشيطِ اللازمةِ للتغيُّرِ الماصِّ للحرارة؟

13. هل تمثلُ المعادلةُ التاليةُ آليَّةَ تفاعلِ احتراقِ البروبانِ، C_3H_8؟ برِّرْ إجابتَك إذا أجبتَ بـ «نعم» أو «لا».

$$C_3H_8(g) + 5O_2(g) \rightarrow 3CO_2(g) + 4H_2O(g)$$

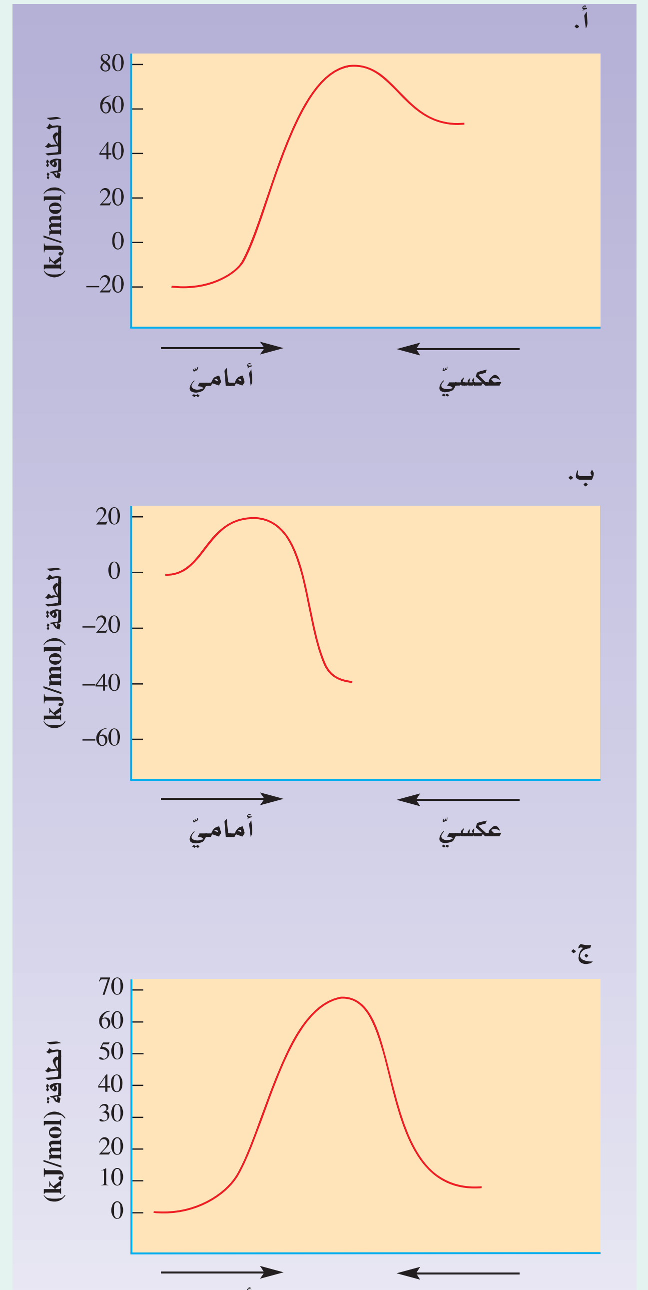
14. تحدثُ عمليَّةُ تفكُّكِ ثاني أكسيدِ النيتروجين $2NO_2 \rightarrow 2NO + O_2$ بخطوتَينِ عند درجاتِ الحرارةِ العالية. الخطوةُ الأولى، $NO_2 \rightarrow NO + O$. توقَّعِ الخطوةَ الثانيةَ، التي تعطي عند جمعِها مع الخطوةِ الأولى، التفاعلَ التامَّ.

15. عرِّفِ الخطوةَ المحدِّدةَ للسرعةِ لتفاعلٍ كيميائيٍّ.

مسائل

الرسومُ البيانيَّةُ للتفاعل

16. لكلٍّ من الأشكالِ البيانيَّةِ للطاقةِ المبيَّنةِ في ما يلي، رمِّزِ: المتفاعلاتِ والنواتجَ و ΔH و E_a و E_a'. كذلك حدِّدْ قيمَ ΔH للتفاعلاتِ الأماميَّةِ والعكسيَّةِ، مع تحديدِ قيمِ E_a و E_a'. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 6-1)



17. ارسمِ الشكلَ البيانيَّ للطاقةِ الذي يصفُ التفاعلاتِ التاليةَ ورمِّزْه. ثم حدِّدْ جميعَ القيمِ المتبقيَّةِ. ضعِ المتفاعلاتِ على مستوى الطاقةِ صفر.

أ. $\Delta H_{\text{أمامي}} = -10$ kJ/mol $E_a' = 40$ kJ/mol

ب. $\Delta H_{\text{أمامي}} = -95$ kJ/mol $E_a = 20$ kJ/mol

ج. $\Delta H_{\text{عكسي}} = -40$ kJ/mol $E_a' = 30$ kJ/mol

قانونُ سرعةِ التفاعل

18. أ. اكتبِ المعادلةَ الموزونةَ لتفاعلٍ له الآليَّةُ المقترحةُ التاليةُ، ثم اكتبْ قانونَ سرعةٍ مناسبٍ. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 6-2)

الخطوةُ 1: $B_2 + B_2 \rightarrow E_3 + D$ بطيء

الخطوةُ 2: $E_3 + A \rightarrow B_2 + C_2$ سريع

ب. جِدْ رتبةَ التفاعلِ تبعًا لكلِّ متفاعلٍ.

ج. ما الرتبةُ الكلِّيَّةُ للتفاعلِ؟

19. تفاعلٌ يتضمَّنُ المتفاعلَينِ A و B يجري بآليَّةِ الخطوةِ الواحدةِ: $2A + B \rightarrow A_2B$. اكتبْ قانونَ سرعةِ هذا التفاعلِ، ما تأثيرُ مضاعفةِ تركيزِ كلٍّ من المتفاعلَينِ على حدَةٍ في سرعةِ التفاعلِ. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 6-2)

20. يعبَّرُ عن تفاعلٍ كيميائيٍّ بالمعادلةِ الموزونةِ $A + 2B \rightarrow C$. أعطَتْ ثلاثُ تجاربَ عمليَّةٍ لسرعةِ تفاعلٍ البياناتِ التاليةَ:

التجربة	[A] الابتدائي M	[B] الابتدائي M	السرعةُ الابتدائيَّةُ لتكوين C M/min
1	0.20	0.20	2.0×10^{-4}
2	0.20	0.40	8.0×10^{-4}
3	0.40	0.40	1.6×10^{-3}

أ. حدِّدْ قانونَ سرعةِ التفاعلِ.

ب. احسبْ قيمةَ ثابتِ السرعةِ النوعيَّةِ.

ج. إذا كانَ التركيزُ الابتدائيُّ لكلٍّ من A و B 0.30 M، فما السرعةُ الابتدائيَّةُ لتكوينِ C؟

د. ما رتبةُ التفاعلِ تبعًا لـ A؟

هـ. ما رتبةُ التفاعلِ تبعًا لـ B؟

مراجعةٌ متنوِّعة

21. ارسمْ أشكالاً بيانيَّةً للطاقةِ تصفُ التفاعلاتِ التاليةَ، ورمِّزْها ثم حدِّدْ جميعَ القيمِ المتبقيَّة. ضع المتفاعلاتِ في مستوى الطاقةِ صفر.

أ. $\Delta H = +30$ kJ/mol $E_a{}' = 20$ kJ/mol

ب. $\Delta H = -30$ kJ/mol $E_a = 20$ kJ/mol

22. وُجِدَ أن لتفاعلٍ معيَّنٍ قانونَ سرعةٍ هو:

$R = k[A][B]^2$

كيف تتأثَّرُ السرعةُ بتغيُّرِ العواملِ التاليةِ؟

أ. تقليلِ تركيزِ A إلى النصف.

ب. زيادةِ التركيزِ الابتدائيِّ لـ B إلى ثلاثةِ أمثالٍ.

ج. مضاعفةِ تركيزِ A مع تقليلِ تركيزِ B إلى النصف.

د. إضافةِ حفّازٍ.

23. اخترْ لكلِّ زوجٍ من الأزواجِ التاليةِ المادةَ أو العمليَّةَ التي تتلاءمُ مع التفاعلِ بسرعةٍ أكبرَ.

أ. سكَّرٌ حبيبيٌّ أو مسحوقٌ.

ب. قصديرٌ في HCl عند درجةِ حرارةِ 298 K، أو قصديرٌ في HCl عند درجةِ حرارةِ 320 K.

ج. 5 g من شريطِ بلاتينٍ سميكٍ، أو 5 g من شريطِ بلاتينٍ رفيعٍ.

24. البياناتُ التاليةُ تمَّ الحصولُ عليها من التفاعل $A + B \rightarrow C$. جدِ الرتبةَ لكلِّ متفاعلٍ.

[A](M)	[B](M)	السرعة (M/s)
0.08	0.06	0.012
0.08	0.03	0.006
0.04	0.06	0.003

تفكيرٌ ناقد

25. توقُّعُ استنتاجات: المعادلةُ الموزونةُ للتفاعلِ المتجانسِ السريعِ بين غازَين هي $4A + B \rightarrow 2C + 2D$. التصادمُ المتزامنُ بين الجزيئاتِ الأربعةِ لمتفاعلٍ وبين جزيءِ المتفاعلِ الآخرِ نادرُ الحدوث، فما الذي تتوقَّعُهُ بالنسبةِ لطبيعةِ آليَّةِ التفاعلِ لنظامِ التفاعلِ هذا؟

26. تطبيقُ نماذج: فسِّرْ سببَ توقُّعِ خطرِ الانفجارِ في بعضِ المناطقِ، كمناجمِ الفحمِ الحجريِّ، ومَعاملِ نشرِ الخشبِ، ومعاملِ تذريةِ الحبوبِ (أي أماكنِ نزعِ قشورِها عن البذورِ) حيثُ توجدُ كمِّيّاتٌ كبيرةٌ من موادَّ مسحوقةٍ وجافَّةٍ قابلةٍ للاشتعالِ.

27. تقييمُ طرائق: ما الخاصَّةُ التي تقاسُ لتحديدِ سرعةِ التفاعلِ التالي؟ برِّرْ إجابتَك.

$$2NO_2(g) \rightarrow N_2O_4(g)$$

بحثٌ وكتابة

28. ابحثْ عن حالاتٍ حولَ مسكنِكَ تجدُ فيها أن سرعاتِ العمليّاتِ (تفاعلاتٍ كيميائيَّةً تحدثُ في الحياةِ من حولِك) قد ازدادَتْ بسببِ الزيادةِ في درجةِ الحرارةِ أو تباطأتْ بسببِ انخفاضِ درجةِ الحرارةِ. ضعْ قائمةً، وناقشِ العمليّاتِ المختلفةَ.

مشروعٌ علمي

29. نفِّذْ مشروعًا علميًّا بعنوانِ «استقصاءُ الظروفِ الأكثرِ ملاءمةً للتخلُّصِ من الترسُّباتِ الملحيَّةِ داخلَ أنابيبِ المياهِ».

الفصــــل 7

الاتِّزانُ الكيميائيُّ

تكوينُ الهوابطِ والصواعدِ نتيجةً لتفاعُلٍ كيميائيٍّ انعكاسيٍّ

القسم 1-7

طبيعةُ الاتِّزانِ الكيميائيِّ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يعرِّفُ الاتِّزانَ الكيميائيَّ.
- يفسِّرُ طبيعةَ ثابتِ الاتِّزانِ.
- يكتبُ تعبيرَ ثابتِ الاتِّزانِ الكيميائيِّ ويجري حساباتٍ تتضمَّنُ هذا التعبيرَ.

في الأنظمةِ التي تكونُ في حالةِ اتِّزانٍ، تحدثُ عملياتٌ متعاكسةٌ في الوقتِ نفسِه والسرعةِ نفسِها. فمثلاً، عندما يوضعُ فائضٌ من السكَّرِ في الماءِ، تدخلُ بعضُ جزيئاتِهِ في المحلولِ، بينما تبقى الجزيئاتُ الأخرى غيرَ ذائبةٍ. عند حالةِ الاتِّزانِ، تتبلورُ جزيئاتُ السكَّرِ بالسرعةِ نفسِها التي تذوبُ بها جزيئاتٌ من البلورةِ. كذلك يمكنُ لسرعةِ تبخُّرِ سائلٍ، في وعاءٍ مغلقٍ أن تصبحَ في نهايةِ الأمرِ مساويةً لسرعةِ تكاثفِ بخارِه. اتِّزانُ الضغطِ البخاريِّ هو خاصيَّةٌ للسائلِ عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ. تُعدُّ الأمثلةُ السابقةُ اتزاناتٍ فيزيائيَّةً. في هذا الفصلِ سوفَ نوسِّعُ مفهومَ الاتِّزانِ، ليشملَ التفاعلاتِ الكيميائيَّةَ. سوفَ تدرسُ كيف يستجيبُ نظامٌ في حالةِ الاتِّزانِ، عندما تتغيَّرُ ظروفُ الاتِّزانِ بتغيُّرِ التركيزِ والضغطِ ودرجةِ الحرارةِ.

التفاعلاتُ الانعكاسيَّةُ

نظريًّا يمكنُ لكلِّ تفاعلٍ أن يحدثَ في اتِّجاهَيْنِ، أماميٍّ وعكسيٍّ. وبشكلٍ عامٍّ تعدُّ كُلُّ التفاعلاتِ الكيميائيةِ انعكاسيَّةً تحت ظروفٍ ملائمةٍ. ***التفاعلُ الكيميائيُّ الذي يمكنُ أن تتفاعلَ خلالَه النواتجُ لإعادةِ تكوينِ المتفاعلاتِ يُسمَّى تفاعلاً انعكاسيًّا*** **reversible reaction**.

يتفكَّكُ أكسيدُ الزئبقِ (II) عندَ تسخينِه.

$$2HgO(s) \xrightarrow{\Delta} 2Hg(l) + O_2(g)$$

يتَّحدُ الزئبقُ والأكسجينُ عندَ تسخينِهما برفقٍ ليكوِّنا أكسيدَ الزئبقِ (II).

$$2Hg(l) + O_2(g) \xrightarrow{\Delta} 2HgO(s)$$

الشكل 1-7 عندَ التسخينِ، يتفكَّكُ أكسيدُ الزئبقِ (II) إلى عنصريهِ: الزئبقِ والأكسجينِ. الزئبقُ السائلُ يتفاعلُ مع الأكسجينِ لإعادةِ تكوينِ أكسيدِ الزئبقِ (II). يمثِّلُ هذانِ التفاعلانِ مجتمعَيْنِ عمليَّةً كيميائيَّةً انعكاسيَّةً.

يبيِّنُ الشكلُ 1-7 حدوثَ هذَيْنِ التفاعلَيْنِ. لنفرضْ أن أكسيدَ الزئبقِ (II) سُخِّنَ في وعاءٍ مغلقٍ لا يمكنُ أن يفلتَ منه الزئبقُ أو الأكسجينُ. وبمجرَّدِ بدءِ التفكُّكِ يعاودُ الأكسجينُ والزئبقُ الناتجانِ اتِّحادَهما من جديدٍ لتكوينِ أكسيدِ الزئبقِ مرَّةً ثانيةً. هكذا يمكنُ للتفاعلَيْنِ أن يحدثا في الوقتِ نفسِه. في هذه الظروفِ ستتساوى، في نهايةِ الأمرِ، سرعةُ تفاعلِ الاتِّحادِ مع سرعةِ تفاعلِ التفكُّكِ. عندَ الاتِّزانِ، سيتَّحدُ الزئبقُ والأكسجينُ ليكوِّنا أكسيدَ الزئبقِ (II) بالسرعةِ نفسِها التي يتفكَّكُ بها أكسيدُ الزئبقِ (II) إلى زئبقٍ وأكسجينٍ. ومن المتوقَّعِ أن تبقى كمِّيّاتُ أكسيدِ الزئبقِ (II)، والزئبقِ والأكسجينِ ثابتةً بدوامِ هذه الظروفِ. عندَ هذه النقطةِ، يتمُّ الوصولُ إلى حالةِ اتِّزانٍ ديناميكيٍّ بين التفاعلَيْنِ الكيميائيَّيْنِ. فهذانِ التفاعلانِ يستمرَّانِ، لكن دونَ أن يحدثَ أيُّ تغييرٍ في

تركيبِ النظامِ. ***يكونُ التفاعلُ الكيميائيُّ الانعكاسيُّ في حالةِ اتّزانٍ كيميائيٍّ*** **chemical equilibrium** ***عندما تتساوى سرعةُ التفاعلِ الأماميِّ مع سرعةِ التفاعلِ العكسيِّ، وتبقى تراكيزُ نواتجِهِ ومتفاعلاتِهِ ثابتةً.*** تُكتبُ المعادلةُ الكيميائيّةُ لتفاعلٍ عندَ الاتّزانِ باستخدامِ أسهمٍ مزدوجةٍ لتشيرَ إلى انعكاسيّةِ التفاعلِ.

$$2HgO(s) \rightleftarrows 2Hg(l) + O_2(g)$$

الاتّزانُ، حالةٌ ديناميكيّةٌ

كثيرٌ من التفاعلاتِ الكيميائيّةِ انعكاسيّةٌ تحتَ الظروفِ العاديّةِ للتركيزِ ودرجةِ الحرارةِ. وتصلُ هذه التفاعلاتُ إلى حالةِ اتّزانٍ، إلا إذا أفلتَتْ أو أُزيلَتْ مادّةٌ واحدةٌ على الأقلِّ من نظامِ التفاعلِ. ومع ذلك، فإنَّ التفاعلَ الأماميَّ يكادُ في بعضِ الحالاتِ أن يصبحَ تامًّا قبلَ أن تصبحَ سرعةُ التفاعلِ العكسيِّ كبيرةً بشكلٍ كافٍ لتحقيقِ اتّزانٍ. فالنظامُ هنا يرجِّحُ تكوينَ النواتجِ (التفاعلَ الأماميَّ)، ممّا يعني أن تركيزَ النواتجِ أعلى من تركيزِ المتفاعلاتِ عندَ حالةِ الاتّزانِ. وكمثالٍ على نظامٍ كهذا تكوُّنُ ثالثِ أكسيدِ الكبريتِ من ثاني أكسيدِ الكبريتِ والأكسجينِ.

$$2SO_2(g) + O_2(g) \rightleftharpoons 2SO_3(g)$$

تجدرُ الملاحظةُ إلى أن المعادلةَ تُكتبُ مع سهمَيْن غيرِ متساويَيْن في طولِهما. يتمثَّلُ التفاعلُ الأماميُّ بالسهمِ الأطولِ، بهدفِ التلميحِ إلى أن الناتجَ هو المرجَّحُ في هذا التفاعُلِ.

في حالاتٍ أخرى لا يكادُ التفاعلُ الأماميُّ يبدأُ عندَما تصبحُ سرعةُ التفاعلِ العكسيِّ مساويةً لسرعةِ التفاعلِ الأماميِّ، فيصلُ النظامُ إلى حالةِ الاتّزانِ. في هذه الحالاتِ، تبقى كمّيّاتُ المُتفاعلاتِ كبيرةً، بينما تكونُ كمّيّاتُ النواتجِ قليلةً، أي إنَّ النظامَ يرجِّحُ تكوينَ المتفاعلاتِ (التفاعلَ العكسيَّ). وكمثالٍ على نظامٍ كهذا، التفاعلُ بينَ حمضِ الكربونيكِ والماءِ.

$$H_2CO_3(aq) + H_2O(l) \rightleftharpoons H_3O^+(aq) + HCO_3^-(aq)$$

في حالاتٍ أخرى أيضًا يحدثُ التفاعلان، الأماميُّ والعكسيُّ، بالقدرِ نفسِه تقريبًا قبلَ الوصولِ إلى الاتّزانِ. هنا لا يُرجَّحُ أيٌّ من التفاعلَيْن على الآخرِ، وبالتالي توجدُ المتفاعلاتُ والنواتجُ، بتراكيزَ مهمَّةٍ عندَ الاتّزانِ. مثالُ ذلك تفكُّكُ حمضِ الكبريتوزِ في الماءِ.

$$H_2SO_3(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + HSO_3^-(aq)$$

تُستخدمُ التفاعلاتُ الكيميائيَّةُ عادةً لتحويلِ المتفاعلاتِ المتوفِّرةِ إلى نواتجَ مرغوبةٍ أكثرَ. لذلك يسعى الكيميائيّون إلى تحويلِ أكبرِ كمّيَّةٍ ممكنةٍ من المتفاعلاتِ إلى نواتجَ. أما مدى تحوُّلِ المتفاعلاتِ إلى نواتجَ، فيُشارُ إليه بالقيمةِ الرقميَّةِ لثابتِ الاتّزانِ.

ثابتُ الاتِّزانِ

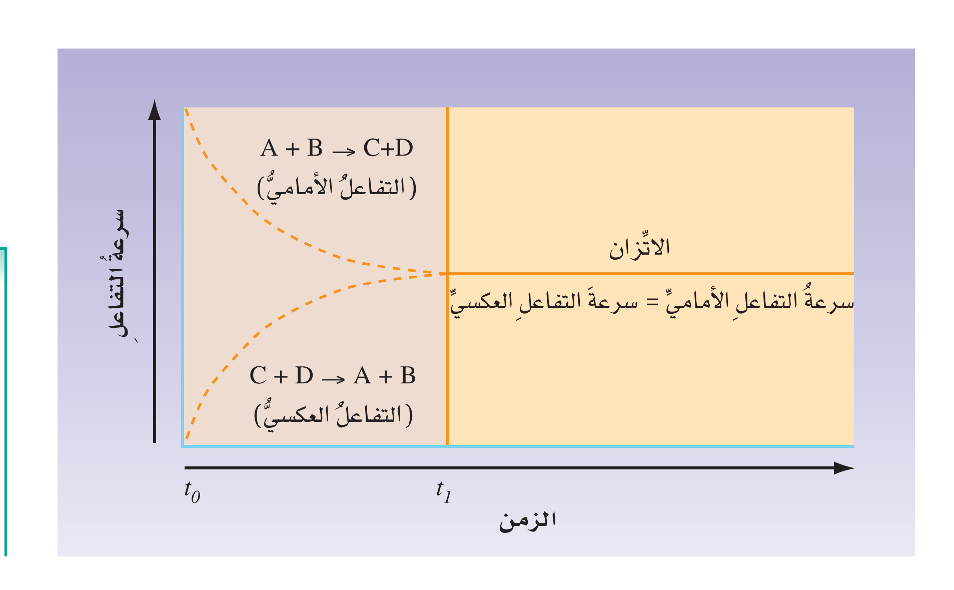
لنفترضْ أن مادتَيْن، A و B، تتفاعلان لتكوينِ الناتجَيْن C و D. بالمقابلِ C و D تتفاعلانِ لتنتجان A و B. تحتَ ظروفٍ مناسبةٍ يحدثُ الاتِّزانُ لهذا التفاعلِ الانعكاسيِّ. تفاعلُ الاتِّزانِ الافتراضيُّ هذا يوصفُ بالمعادلةِ العامَّةِ التاليةِ:

$$nA + mB \rightleftarrows xC + yD$$

في البدايةِ تكونُ تراكيزُ المادَّتَيْنِ C و D صفرًا، بينما تكونُ تراكيزُ المادَّتَيْنِ A و B في حدِّها الأقصى. يبيِّنُ الشكلُ 7-2 أنَّ سرعةَ التفاعلِ الأماميِّ تنخفضُ مع مرورِ الزمنِ عندما تُستهلكُ المادتان A و B. في هذهِ الأثناءِ، تزدادُ سرعةُ التفاعلِ العكسيِّ مع تكوُّنِ المادتَيْنِ C و D. وعندما تصبحُ هاتان السرعتان متساويتَيْنِ يتحقَّقُ الاتِّزانُ. أما تركيزُ كلٍّ من A و B و C و D فلن يخضعَ بعد ذلك لأيِّ تغيُّرٍ إذا بقيَتِ الظروفُ نفسَها.

بعدَ الوصولِ إلى الاتِّزانِ، تبقى تراكيزُ النواتجِ والمتفاعلاتِ ثابتةً. لذلك يجبُ أن تبقى نسبةُ هذهِ التراكيزِ أيضًا ثابتةً. إنَّ نسبةَ الحاصلِ الرياضيِّ $[C]^x \times [D]^y$ إلى الحاصلِ الرياضيِّ $[A]^n \times [B]^m$ لهذا التفاعلِ لها قيمةٌ محدَّدةٌ عندَ درجةِ حرارةٍ محدَّدةٍ. هذه النسبةُ هي ثابتُ اتِّزانِ التفاعلِ الذي يُرمزُ إليه بالحرفِ K. المعادلةُ الآتيةُ تصفُ ثابتَ الاتِّزانِ لنظامِ الاتِّزانِ الافتراضيِّ. وتشيرُ القوسانِ [ ] إلى تركيزِ كلِّ مادَّةٍ بـ mol/L. والرموزُ العلويَّةُ هي مُعامِلاتُ كلٍّ من الموادِّ الظاهرةِ في معادلةِ التفاعلِ الموزونةِ:

$$K = \frac{[C]^x[D]^y}{[A]^n[B]^m}$$



الشكل 7-2 يبيِّنُ الشكلُ سرعاتِ التفاعلِ لنظامِ الاتزانِ الافتراضيِ $A + B \rightleftarrows C + D$، ابتداءً من الزمنِ الذي تخلطُ فيه المادّتانِ A و B. عند t_0، تنخفضُ سرعةُ التفاعلِ الأماميِّ، وتزدادُ سرعةُ التفاعلِ العكسيِّ، حتى تتساوى سرعتا التفاعلَيْنِ في الزمنِ t_1 عندما يبدأُ الاتزانُ.

تظهرُ في بسطِ الكسرِ تراكيزُ الموادِّ الموجودةِ في الطرفِ الأيمنِ من المعادلةِ الكيميائيَّةِ. وأسُّ كلِّ تركيزٍ يساوي مُعاملَ المادَّةِ التابعةِ له في معادلةِ التفاعلِ الموزونةِ. هذه الموادُّ هي النواتجُ في التفاعلِ الأماميِّ. أما تراكيزُ الموادِّ الموجودةِ في الطرفِ الأيسرِ من المعادلةِ الكيميائيَّةِ، فتظهرُ في مقامِ الكسرِ. هنا أيضًا يساوي الأسُّ الظاهرُ على كلِّ تركيزٍ معاملَ المادَّةِ التابعةِ له في معادلةِ التفاعلِ الموزونةِ. هذه الموادُّ هي المتفاعلاتُ في التفاعلِ الأماميِّ. لا يعتمدُ الثابتُ K على التراكيزِ الابتدائيَّةِ. مع ذلك، فإنَّه يعتمدُ على درجةِ حرارةِ النظامِ.

يتمُّ الحصولُ على قيمةِ K الرقميَّةِ لنظامِ اتِّزانٍ معيَّنٍ، بواسطةِ التجربةِ العمليَّةِ. يتعيَّنُ أن يُحلِّلَ الكيميائيُّ خليطَ الاتِّزانِ، وأن يحدِّدَ تراكيزَ كلِّ الموادِّ. قيمةُ K لتفاعلِ اتِّزانٍ محدَّدٍ عندَ درجةِ حرارةٍ محدَّدةٍ، تُبيِّنُ مدى تحوُّلِ المتفاعلاتِ إلى نواتجِ التفاعلِ. فإذا كانَتْ K تساوي 1 عندَ الاتِّزانِ، تكونُ تراكيزُ المتفاعلاتِ والنواتجِ شبهَ متساويةٍ. لكن إذا كانَتْ قيمةُ K صغيرةً، فهذا يعني أن التفاعلَ الأماميَّ يحدثُ بشكلٍ طفيفٍ جدًّا قبلَ الوصولِ إلى الاتِّزانِ، وأن المتفاعلاتِ هي المرجَّحةُ. كذلك تشيرُ القيمةُ الكبيرةُ للثابتِ K إلى درجةِ تحوُّلٍ كبيرةٍ للمتفاعلاتِ الأصليَّةِ إلى نواتجَ. تتضمَّنُ معادلةُ الثابتِ K تراكيزَ الموادِّ التي تتغيَّرُ فعليًّا فقط. هذا يعني أن الموادَّ الصلبةَ والسوائلَ النقيَّةَ تُحذفُ من معادلةِ الثابتِ K، لأن تراكيزَها لا يُمكنُ أن تتغيَّرَ.

هذا يعني بشكلٍ عامٍ أن **ثابتَ الاتِّزانِ equilibrium constant**، K، هو ***نسبةُ الحاصلِ الرياضيِّ لتراكيزِ الموادِّ الناتجةِ عندَ الاتِّزانِ، إلى الحاصلِ الرياضيِّ لتراكيزِ الموادِّ المتفاعلةِ. كلٌّ مرفوعٌ إلى أسٍّ يساوي معاملَ المادَّةِ التابعةِ له في المعادلةِ الكيميائيَّةِ.***

نظامُ اتِّزانِ H_2، I_2، HI

تأمَّلِ التفاعلَ الذي يحدثُ بينَ غازِ الـ H_2 وبخارِ I_2 في وعاءٍ محكمِ الإغلاقِ عندَ درجةِ حرارةٍ مرتفعةٍ. يمكنُ متابعةُ سرعةِ التفاعلِ بمراقبةِ السرعةِ التي تخفُّ عندَها حدَّةُ اللونِ البنفسجيِّ لبخارِ اليودِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 7-3. إذا وُجِدَ غازُ الـ H_2 العديمُ اللونِ بكمّيَّةٍ فائضةٍ، فيمكنُنا أن نتوقَّعَ استمرارَ التفاعلِ حتى استهلاكِ كلِّ اليودِ، I_2، وانخفاضَ حدَّةِ اللونِ البنفسجيِّ في الأنبوبِ حتى يتفاعلَ اليودُ بشكلٍ تامٍّ. عندئذٍ تصبحُ محتوياتُ الأنبوبِ عديمةَ اللونِ، لأن كلاًّ من HI وفائضِ H_2 عديمُ اللونِ.

في الواقعِ تخفُّ حدَّةُ اللونِ، لكنَّه لا يختفي تمامًا، لأنَّ التفاعلَ انعكاسيٌّ. ذلكَ أن يوديدَ الهيدروجينِ يتفكَّكُ ليعيدَ تكوينَ الهيدروجينِ واليودِ. فتزدادُ سرعةُ هذا التفاعلِ العكسيِّ مع ازديادِ تركيزِ يوديدِ الهيدروجينِ. تطابقًا مع هذه الزيادةِ، تنخفضُ سرعةُ التفاعلِ الأماميِّ. عندَما تصبحُ سرعتا التفاعلَيْن المتعاكسَيْن متساويتَيْن يتحقَّقُ الاتِّزانُ. ويشيرُ اللونُ الثابتُ إلى وجودِ اتِّزانٍ بين الهيدروجينِ واليودِ ويوديدِ الهيدروجينِ. المعادلةُ الكيميائيةُ لنظامِ التفاعلِ عند الاتِّزانِ هي الآتيةُ:

$$H_2(g) + I_2(g) \rightleftarrows 2HI(g)$$

انطلاقًا من هذه المعادلةِ الكيميائيَّةِ، يمكنُ كتابةُ تعبيرِ ثابتِ الاتِّزانِ، كما يلي:

$$K = \frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$$

حيثُ يعلو الأسُّ 2 تركيزَ HI، لأن مُعامِلَ الـ HI في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ هو 2.

قاسَ الكيميائيّون بدقّةٍ تراكيزَ H_2، I_2، HI في خليطِ الاتّزان، عندَ درجاتِ حرارةٍ متعدّدةٍ. في بعضِ التجارب، مُلئتِ الأوعيةُ الزجاجيّةُ بيوديدِ الهيدروجينِ تحتَ ضغطٍ معلومٍ، وحُفظَتْ عندَ درجةِ حرارةٍ ثابتةٍ، حتى الوصولِ إلى الاتّزان. في تجاربَ أُخرى، كانَ الهيدروجينُ واليودُ هما المادّتان المتفاعلتان الأصليّتان. يُظهرُ الجدولُ 7-1 البياناتِ العمليّةَ مجتمعةً مع القيمِ المحسوبةِ للثابتِ K. تبدأُ التجربتان 1 و 2 مع يوديدِ الهيدروجين، بينما تبدأُ التجربتان 3 و 4 مع الهيدروجينِ واليودِ. لاحظِ التقاربَ بين القيمِ الرقميَّةِ لثابتِ الاتّزانِ في كلِّ الحالاتِ.

عندَ درجةِ 425°C، يبلغُ متوسّطُ قيمةِ ثابتِ الاتّزانِ لنظامِ تفاعلِ الاتّزانِ هذا، 54.34. هذه القيمةُ لـ K ثابتةٌ لأيِّ نظامٍ من H_2، I_2، وHI، في حالةِ الاتّزانِ عندَ درجةِ الحرارةِ المذكورةِ. إذا اختلفَتْ نتيجةُ حسابِ K، فيجبُ أن يكونَ هناك سببٌ لذلك. فإما أن نظامَ H_2، I_2، HI لم يصلْ إلى الاتّزان، وإما أن درجةَ حرارةِ النظامِ ليسَتْ 425°C.

المعادلةُ الكيميائيَّةُ الموزونةُ لنظامِ اتّزانٍ ضروريةٌ لكتابةِ تعبيرِ ثابتِ الاتّزان. تُبيّنُ البياناتُ في الجدولِ 7-1 أنَّ صحّةَ هذا التعبيرِ تتأكّدُ عندمَا يتمُّ تحديدُ القيمِ الفعليّةِ لتراكيزِ الاتّزانِ للمُتفاعلاتِ وللنواتجِ عمليًّا. تُحسبُ قيمُ K من هذه التراكيزِ، ولا يتطلَّبُ ذلك أيَّ معلوماتٍ تتعلّقُ بحركيَّةِ النظامِ المتفاعل.

حالما تصبحُ قيمةُ ثابتِ الاتّزانِ معروفةً، يمكنُ استخدامُ تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ لحسابِ تراكيزِ المتفاعلاتِ أو النواتجِ عندَ الاتّزان. لنفرضْ أن نظامَ اتّزانٍ عندَ درجةِ حرارةِ 425°C يحتوي على 0.015 mol/L لكلٍّ من H_2 و I_2. لإيجادِ تركيزِ HI في هذا النظامِ، أعدْ تنظيمَ تعبيرِ ثابتِ الاتّزان، كما هو مبيَّنٌ في المعادلاتِ التاليةِ:

$$K = \frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$$

$$[HI] = \sqrt{K\,[H_2][I_2]}$$

باستخدامِ قيمةِ K المعروفةِ وتركيزَيْ H_2 و I_2 المعطيَيْن، حُلَّ معادلةَ [HI]:

$$[HI] = \sqrt{0.015 \times 0.015 \times 54.34}$$

$$[HI] = 0.11 \text{ mol/L}$$

(أ)

(ب)

(ج)

الشكل 7-3 ينتجُ غازُ يوديدِ الهيدروجينِ من غازِ الهيدروجين وبخارِ اليودِ. تخفُّ حدّةُ اللونِ البنفسجيِّ لبخارِ اليودِ (أ) عندمَا يستهلكُ التفاعلُ اليودَ (ب). لا يختفي اللونُ البنفسجيُّ، بل يبلغُ حدَّةً ثابتةً عندمَا يبلغُ التفاعلُ حالةَ الاتزانِ (ج).

الجدول 7-1 تراكيزُ الاتّزانِ لـ H_2، I_2، HI، بـ mol/L عند 425°C

التجربة	$[H_2]$	$[I_2]$	$[HI]$	$K = \frac{[HI]^2}{[H_2][I_2]}$
1	0.4953×10^{-3}	0.4953×10^{-3}	3.655×10^{-3}	54.46
2	1.141×10^{-3}	1.141×10^{-3}	8.410×10^{-3}	54.33
3	3.560×10^{-3}	1.250×10^{-3}	15.59×10^{-3}	54.62
4	2.252×10^{-3}	2.336×10^{-3}	16.85×10^{-3}	53.97

مسألةٌ نموذجية 1-7

خليطُ اتّزانٍ غازيّ من N_2، O_2، NO عندَ درجةِ حرارةِ 1500 K، يحتوي على 6.4×10^{-3} mol/L N_2، و 1.7×10^{-3} mol/L O_2، و 1.1×10^{-5} mol/L NO. ما قيمةُ ثابتِ الاتّزانِ للتفاعلِ $N_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO(g)$، عندَ درجةِ الحرارةِ المذكورة؟

الحلّ

1 حلّل

المعطى: $[N_2] = 6.4 \times 10^{-3}$ mol/L

$[O_2] = 1.7 \times 10^{-3}$ mol/L

$[NO] = 1.1 \times 10^{-5}$ mol/L

المجهول: K

2 خطّط

المعادلةُ الكيميائيَّةُ الموزونةُ هي: $N_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO(g)$

تعبيرُ ثابتِ الاتّزانِ هو:

$$K = \frac{[NO]^2}{[N_2][O_2]}$$

3 احسبْ

استبدلْ بالتراكيزِ قيمَها المعطاةَ في تعبيرِ الاتّزان

$$K = \frac{(1.1 \times 10^{-5}\ \text{mol/L})^2}{(6.4 \times 10^{-3}\ \text{mol/L})(1.7 \times 10^{-3}\ \text{mol/L})} = 1.1 \times 10^{-5}$$

4 قيّمْ

قيمةُ K المحسوبةُ صغيرةٌ. وهذا ينسجمُ مع كمّياتٍ من N_2 و O_2 أكبرَ من كمّيّةِ NO المتوفّرةِ عندَ الاتّزان. يتكوَّنُ الجوابُ من العددِ الصحيحِ للأرقامِ المعنوية.

تمارينُ تطبيقية

1. خليطُ اتزانٍ غازيٍّ من N_2، H_2، NH_3 عندَ 500°C يحتوي على N_2 0.602 mol/L، H_2 0.420 mol/L، NH_3 0.113 mol/L، ما قيمةُ ثابتِ الاتّزانِ للتفاعلِ $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$ عندَ درجةِ الحرارةِ المذكورة؟

2. في وعاءٍ سعةِ 5.00 L، يصلُ التفاعلُ $AB_2C(g) \rightleftarrows B_2(g) + AC(g)$ إلى حالةِ الاتّزانِ عندَ 900 K. عندَ الاتّزان، وُجِدَ أنَّ النظامَ يحتوي على 0.084 mol من AB_2C، و 0.035 mol من B_2، و 0.059 mol من AC. ما قيمةُ ثابتِ الاتّزانِ لهذا النظامِ عندَ درجةِ الحرارةِ المذكورة؟

3. عندَ درجةِ حرارةِ 600°C، يتفاعلُ غازُ ثنائي أكسيدِ الكبريتِ مع غازِ الأكسجينِ لينتجَ غازُ ثلاثي أكسيدِ الكبريت. عندَ درجةِ الحرارةِ هذه وُجِدَ أن تركيزَ SO_2 هو 1.50 mol/L، وتركيزَ O_2 هو 1.25 mol/L. احسبْ تركيزَ SO_3 إذا علمْتَ أنَّ ثابتَ الاتّزانِ لهذا النظامِ يساوي 4.36.

الجواب

1. 0.286
2. 4.9×10^{-3}
3. 3.50 mol/L

مراجعةُ القسم 1-7

1. ما المقصودُ بكلٍّ من:

أ. الاتِّزانِ الكيميائيِّ؟

ب. ثابتِ الاتِّزانِ؟

2. كيف ترتبطُ قيمةُ ثابتِ الاتِّزانِ بالكمّيّاتِ النسبيَّةِ للمتفاعلاتِ والنواتجِ عندَ الاتِّزانِ؟

3. حمضُ الهيدروكلوريك، HCl، حمضٌ قويٌّ يتأيَّنُ بشكلٍ تامٍّ في الماءِ، ليكوِّنَ H_3O^+ و Cl^-. هل تتوقَّعُ أن تكونَ قيمةُ K للتفاعلِ

$$HCl(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

تساوي 1×10^{-2}، أم 1×10^{-5} أم «أكبرَ بكثيرٍ»؟ برِّرْ إجابتك.

4. اكتُبْ تعبيرَ ثابتِ الاتِّزانِ للتفاعلِ:

$$4HCl(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2Cl_2(g) + 2H_2O(g)$$

5. عندَ درجةِ حرارةِ 2500 K وفي حالةِ الاتِّزانِ يكونُ $[HCl] = 0.0625$ mol/L و $[H_2] = [Cl_2] = 0.00450$ mol/L للتفاعل: $H_2(g) + Cl_2(g) \rightleftarrows 2HCl(g)$. احسبْ قيمةَ ثابتِ الاتِّزانِ K للتفاعلِ.

6. عندَ درجةِ حرارةِ 425°C، وجِدَ أن خليطَ اتِّزانٍ يتكوَّنُ من 1.83×10^{-3} mol/L H_2، و 3.13×10^{-3} mol/L I_2 و 1.77×10^{-2} mol/L HI. احسبْ ثابتَ الاتِّزانِ K للتفاعل: $H_2(g) + I_2(g) \leftrightarrows 2HI(g)$.

7. احسبْ، عندَ درجةِ حرارةِ 425°C، قيمةَ [HI] للتفاعلِ: $H_2(g) + I_2(g) \rightleftarrows 2HI(g)$ إذا كانَتْ $[H_2] = [I_2] = 4.79 \times 10^{-4}$ mol/L و $K = 54.3$.

تفكيرٌ ناقد

8. علاقاتُ استدلالٍ: استخدمْ بياناتِ التجربةِ 1 في الجدول 1-7 لحسابِ قيمةِ K للتفاعلِ $2HI(g) \rightleftarrows H_2(g) + I_2(g)$. هل ترى علاقةً بينَ القيمةِ التي حصلْتَ عليها والقيمةِ الموجودةِ في الجدولِ؟

قراءةٌ علميَّةٌ

إيجادُ حلٍّ لمشكلةِ تثبيتِ النيتروجين

نظرةٌ تاريخيَّةٌ

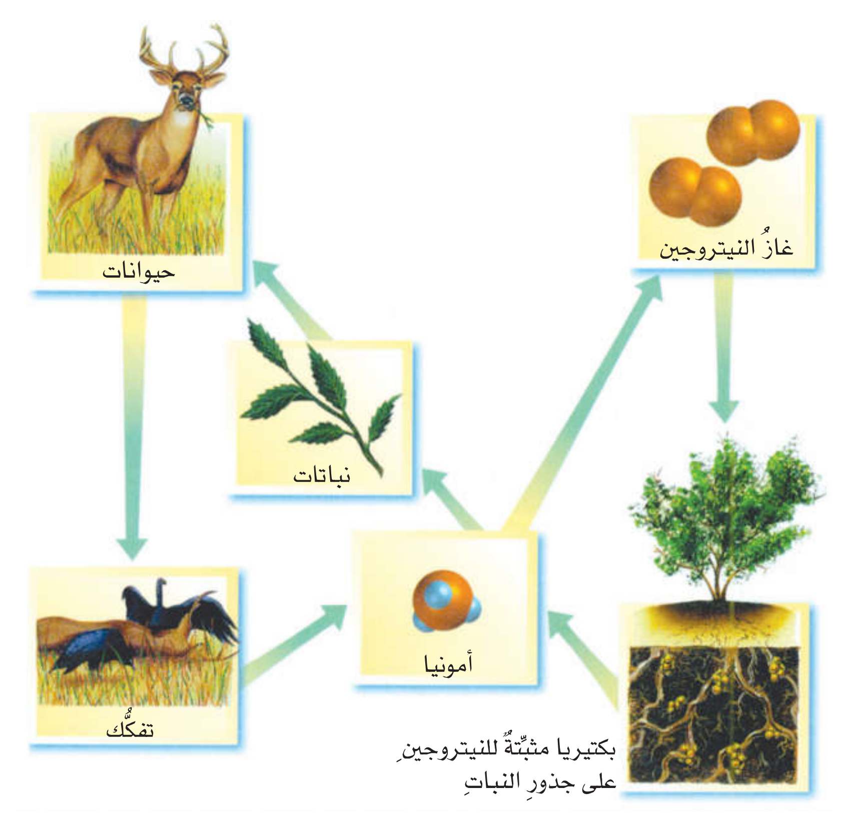
تُنتِجُ الصناعةُ الكيميائيَّةُ، كلَّ سنةٍ، أطنانًا من الأسمدةِ النيتروجينيَّةِ، لزيادةِ الإنتاجِ الزراعيِّ على الأرض. لكن قبلَ سنةِ 1915 كانَ على الناسِ أنْ يعتمدوا فقطْ على المصادرِ الطبيعيَّةِ للأسمدةِ. سبَّبَ تضاؤلُ هذهِ الموادِّ خشيةً واسعةَ الانتشارِ من حدوثِ مجاعةٍ عالميَّةٍ. مع ذلك فقد تمَّ تجنُّبُ نشوءِ أزمةٍ باكتشافِ حلٍّ لـ «مشكلةِ النيتروجين»، وهيَ عبارةٌ استُخدمَتْ في ذلك الوقتِ لوصفِ نقص النيتروجين المفيد، رغمَ وفرتِه في الجوِّ.

تهديدُ مالتوس

سنةَ 1798 نشرَ توماس مالتوس تقريرَه الشهيرَ «بحثٌ عن عددِ السكّان»، الذي أفادَ بأنَّ مخزونَ الغذاءِ العالميَّ لن يستطيعَ أن يواكبَ عددَ السكّان، وتوقَّعَ المجاعةَ والموتَ والبؤسَ. ويبدو أن تحذيرَ مالتوس قد وجدَ انعكاسًا في مجاعةِ البطاطا الكبرى التي حدثَتْ في إيرلندا سنةَ 1840. والواقعُ أنَّ باقيَ الدولِ الأوروبيَّةِ كان يمكنُ أن تعانيَ نقصًا في الغذاءِ، عندَما لم يزددْ مردودُ المحصول في الفدّانِ الواحدِ لدى استخدامِ أسمدةٍ تحتوي على النيتروجين.

القليلُ من الكائناتِ الحيَّةِ يمكنُها أن تنتفعَ من غازِ (N_2) الذي يشكِّلُ 78% من الهواءِ الجوّيِّ. ولكي تبقى على قيدِ الحياةِ، تحتاجُ إلى النيتروجينِ المتَّحدِ مع عناصرَ أخرى، أي النيتروجينِ المثبَّتِ.

لكنَّ التربةَ تفتقرُ غالبًا إلى كمّيّاتٍ كافيةٍ من الكائناتِ الحيَّةِ التي تثبِّتُ النيتروجينَ في النباتاتِ. لذلك تضافُ إلى التربةِ الأسمدةُ التي تحتوي على مركّباتِ النيتروجين المستخدَمةَ. في سنةِ 1898 كانتْ تشيلي مصدرَ ثُلثَيِ التموينِ العالميِّ من هذه المركَّباتِ. ففيها تتوفَّرُ طبقاتٌ من نيتراتِ الصوديوم، أو نيتراتِ التشيلي (Chile saltpeter). لكن عندَما كانَ الكيميائيُّ وليم كروكس (William Crookes) يشدِّدُ، في كلامِه إلى الرابطةِ البريطانيَّةِ تلكَ السنةَ، أن هذه الكمّيّاتِ الاحتياطيَّةَ من النيتراتِ محدودةٌ، كانَ على زملائِه أن يقوموا بمهمّةِ اكتشافِ بدائلَ تحولُ دونَ تحذيرِ مالتوس المرعبِ من أن يصبحَ حقيقةً.



يحرَّرُ النيتروجينُ عندما تموتُ الكائناتُ الحيةُ، وكذلكَ من النفاياتِ الحيوانيَّةِ والموادِّ النباتيَّةِ. بعضُ البكتيريا لها القدرةُ على كسرِ الرابطةِ في جزيءِ النيتروجين، فتحرِّرُ بذلكَ ذرّاتُ النيتروجينِ التي تتَّحدُ مع الهيدروجينِ لتكوّنَ الأمونيا. إذ ذاك تستطيعُ النباتاتُ أن تمتصَّ النيتروجينَ بهذا الشكلِ من التربةِ. وتستفيدُ الحيواناتُ من النيتروجينِ إذ تأكلُ هذهِ النباتاتِ.

خلافُ هابر-نرنست

خلالَ تسعينياتِ القرنِ التاسعَ عشرَ، بيَّنَ كيميائيّون أنَّ الأمونيا، وهي مصدرٌ للنيتروجينِ المثبَّتِ، يمكنُ، عندَ درجاتِ حرارةٍ مرتفعةٍ، وتحتَ الضغطِ الجويِّ، تحضيرُها من عنصرَيِ الهيدروجينِ والنيتروجينِ. لكنَّ المشكلةَ تمثَّلتْ في أن كمّياتِ الناتجِ النهائيِّ كانَتْ قليلةً جدًّا إلى درجةٍ اعتبرَتِ العمليةُ معها غيرَ مفيدةٍ صناعيًّا.

في سنةِ 1904، كان الكيميائيُّ الألماني فريتز هابر (Fritz Haber) يؤكِّدُ هذه النتائجَ. فقد جرَّبَ تفاعلاً بينَ الهيدروجينِ والنيتروجينِ عندَ درجاتِ حرارةٍ فوق 1020°C، مستخدمًا الحديدَ النقيَّ وكذلك فلزّاتٍ أُخرى كمحفِّزاتٍ. فوجدَ أنَّ كمّيَّةَ الأمونيا كانَتْ فقط من 0.005% إلى 0.012% عند الاتِّزانِ.

فاستبعدَ هابر إمكانيَّةَ إنتاجِ الأمونيا من عناصرِها. ولكن، سنةَ 1906، حسَبَ والتر نرنست (Walther Nernst)، تركيزَ الأمونيا النظريَّ عندَ اتِّزانِ التفاعلِ، وذلك تحتَ تأثيرِ قيَمٍ متعدِّدةٍ للضغطِ. فوجدَ أن قيمةَ الأمونيا التي حصلَ عليها تحتَ الضغطِ الجوّيِّ لا تتَّفقُ أبدًا مع هابر، فنشرَ نتائجَهُ متحدِّيًا هابر.

كان هابر مقتنعًا أنه على حقٍّ. فأجرى التفاعلَ تحتَ ضغطٍ أعلى ليصلَ إلى كمّيَّةٍ من الأمونيا يمكنُ قياسُها بدقّةٍ أكبرَ.

أكّد هابر ومساعدوه نتائجَهم الأصليَّةَ. وسلَّمَ نرنست لاحقًا بخطأٍ رياضيٍّ ارتكبَه. لكنَّ الأهمَّ أن جولةَ التجاربِ الجديدةِ التي أجراها كانَتْ تشيرُ إلى أنَّ بالإمكانِ التوصُّلَ إلى كمّيَّةٍ معقولةٍ من الأمونيا تحتَ ضغطِ 200 atm (402 KPa)، وذلك باستخدامِ اليورانيوم أو الأوسميوم كمحفِّزاتٍ.

تكبيرُ المقياس

لم تكنِ التجهيزاتُ ذاتُ المقياسِ الكبيرِ، والتي تستطيعُ مقاومةَ الضغوطِ العاليةِ، معروفةً في ذلك الوقتِ. كذلك كانَ الأوسميومُ واليورانيومُ نادرَيْنِ لدرجةِ أنَّ كلفتهما لم تكنْ ملائمةً للصناعةِ. مع ذلك، فإنَّ الشركةَ الألمانيةَ BASF، اشترتْ سنةَ 1909 حقوقَ اكتشافاتِ هابر، وكلّفَتِ المهندسَ الكيميائيَّ الموهوبَ لديها كارل بوش (Karl Bosch) إيجادَ نظامٍ ذي قياسٍ صناعيٍّ يجعلُ العمليَّةَ مربحةً.

في الوقتِ الحاضرِ، تصنَّعُ الأمونيا للتجارةِ في وحداتٍ صناعيَّةٍ شبيهةٍ بهذه الوحدةِ الظاهرةِ في الصورةِ.

بعد حوالي خمسِ سنواتٍ، نجحَ بوش وكبيرُ كيميائيّي الشركةِ في تطويرِ وحداتِ تصنيعٍ مناسبةٍ يمكنُها معالجةُ ضغوطِ التفاعلِ العاليةِ. واكتشفا كذلك أنَ محفِّزًا من حديدٍ يحتوي على كمّيَّةٍ قليلةٍ من الشوائبِ هو البديلُ الفعّالُ للفلزّاتِ النادرةِ التي استخدمَها هابر.

خاتمةٌ مثيرةٌ للخوفِ

في سبتمبر 1913، كانتْ شركةُ BASF تنتجُ 20 طنًّا من الأمونيا في اليومِ، مستخدمةً عمليَّةَ هابر-بوش. في نهايةِ الأمرِ، أنتجَتِ الصناعةُ الكيميائيَّةُ كمّيّاتٍ كافيةً من الأمونيا لتحريرِ ألمانيا والعالمِ من التبعيَّةِ لأسمدةِ نيترات تشيلي. وبذلك أحبطَ الكيميائيّون تحذيرَ مالتوس. مع ذلك فقد ثبتَ أن النصرَ كان نصرًا طعمُه مرّ. وأصبحَتْ عمليَّةُ تركيبِ الأمونيا الجديدةُ أساسًا لإنتاجِ حمضِ النيتريكِ الداخلِ في صناعةِ العديدِ من الموادِّ المتفجِّرةِ التي استخدمَتْ في حروبٍ هزَّتْ أوروبا وباقي الكرةِ الأرضيَّةِ، في النصفِ الأوَّلِ من القرنِ العشرينِ.

أسئلة

1. ما الاستخدامُ الأهمُّ للأمونيا؟
2. ماذا وجدَ هابر عندَما جرَّبَ إنتاجَ الأمونيا تحتَ ضغطٍ أعلى؟

القسم 2-7

انزياحُ الاتّزانِ

مؤشّراتُ الأداءِ

- يستقصي أثرَ العواملِ التي تسبّبُ اضطرابَ الاتّزانِ.
- يستقصي الظروفَ التي تجعلُ التفاعلَ تامًّا.
- يفسّرُ تأثيرَ الأيونِ المشتركِ.

في الأنظمةِ التي تصلُ إلى الاتّزانِ الكيميائيِّ، تبقى الكمّيّاتُ النسبيّةُ للمتفاعلاتِ وللنواتجِ نفسَها. لكنَّ تغيُّراتٍ في التركيزِ أو في الضغطِ أو في درجةِ الحرارةِ، قد تبدِّلُ وضعَ الاتّزانِ، وتغيِّرُ الكمّيّاتِ النسبيّةَ للمتفاعلاتِ والنواتجِ. وبإزاحةِ الاتّزانِ إلى الاتّجاهِ المرغوبِ، يمكنُ للكيميائيين غالبًا أن يحسّنوا مردودَ النواتجِ الذي يسعون إليه.

توقُّعُ اتّجاهِ الانزياحِ

في سنةِ 1888، طوَّرَ الكيميائيُّ الفرنسيُّ هنري لويس لو شاتيليه (Henri Louis Le Châtelier) مبدأً يوفّرُ آليّةً لتوقُّعِ أثرِ توتُّرٍ ما على نظامٍ متّزنٍ. ينصُّ مبدأُ لو شاتيليه على التالي: ***إذا تعرّضَ نظامٌ متّزنٌ لتوتّرٍ، فإن الاتّزانَ ينزاحُ إلى الاتّجاهِ الذي يؤدّي إلى إزالةِ هذا التوتُّرِ.*** هذا المبدأُ صحيحٌ على كلِّ الاتّزاناتِ الديناميكيّةِ، كيميائيّةً كانَت أم فيزيائيّةً. إن تغيُّراتِ التركيزِ والضغطِ ودرجةِ الحرارة توضِّحُ مبدأَ لو شاتيليه.

تغيُّراتُ التركيزِ

إن زيادةَ تركيزِ أيِّ متفاعلٍ تمثِّلُ توتُّرًا يؤثِّرُ على نظامِ الاتّزانِ. لنتأمَّلِ التفاعلَ الافتراضيَّ التالي:

$$A + B \rightleftarrows C + D$$

تحدثُ زيادةُ تركيزِ A توتُّرًا، ولإزالةِ هذا التوتُّرِ يتفاعلُ بعضٌ من المضافِ A مع B ليكوِّنَ الناتجَيْنَ C و D. يصلُ النظامُ إلى حالةِ اتّزانٍ جديدةٍ مع تركيزٍ لـ A أعلى ممّا كانَ عليهِ قبلَ الزيادةِ، ومع تركيزٍ أدنى لـ B. يوضّحُ الشكلُ 7-4 تأثيرَ زيادةِ تركيزِ المتفاعلِ على نظامٍ متّزنٍ. وبشكلٍ مشابهٍ تدفعُ زيادةٌ في تركيزِ B التفاعلَ إلى اليمينِ. كذلك يُحدثُ انخفاضُ تركيزِ C أو D التأثيرَ نفسَه الذي يحدثُه ارتفاعُ تركيزِ A و B على وضعِ الاتّزانِ، أي إن الاتّزانَ ينزاحُ إلى اليمينِ.

غيرَ أن تغيُّراتِ التركيزِ ليسَ لها أيُّ تأثيرٍ على قيمةِ ثابتِ الاتّزانِ. والسببُ في ذلك يكمنُ في أن هذه التغيراتِ لها تأثيرٌ متساوٍ على بسطِ تعبيرِ ثابتِ الاتزانِ ومقامِه. لهذا تعطي التراكيزُ الجديدةُ القيمةَ نفسَها أو النسبةَ الرقميةَ نفسَها لثابتِ الاتّزانِ، عندما يصلُ النظامُ إلى حالةِ اتّزانٍ جديدةٍ.

تتضمَّنُ عمليّاتٌ كيميائيّةٌ كثيرةٌ تفاعلاتٍ غيرَ متجانسةٍ، حيث تكونُ المُتفاعلاتُ أو النواتجُ في أطوارٍ مختلفةٍ. فتراكيزُ الموادِّ النقيّةِ الصلبةِ والسائلةِ لا تتغيَّرُ، وهي اصطلاحًا لا تكتبُ في تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ. كما أن مذيبًا كالماءِ في نظامٍ يتضمَّنُ أحماضًا

وقواعدَ، لا يدخلُ في تعبيرِ ثابتِ الاتِّزان. في الفصل 4، استُخدمَ في تعبيرِ K_w هذا الاصطلاحُ. فالتفاعلُ الذي يمثِّلُ التأيُّنَ الذاتيَّ للماءِ هو:

$$2H_2O\ (l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + OH^-(aq)$$

ومعادلةُ K_w هي $K_w = [H_3O][OH^-]$.

تصفُ المعادلةُ التاليةُ نظامَ الاتِّزانِ لتفكُّكِ كربوناتِ الكالسيومِ الصلبةِ.

$$CaCO_3(s) \rightleftarrows CaO(s) + CO_2(g)$$

نواتجُ هذا التفاعلِ مادةٌ صلبةٌ وغازٌ. وبما أن $CaCO_3$ و CaO مادتان صُلبتان، فهما لا تظهران في تعبيرِ ثابتِ الاتِّزان، ممّا يؤدي إلى التعبيرِ التالي لثابتِ الاتِّزان:

$$K = [CO_2]$$

فثنائي أكسيدِ الكربونِ هو المادةُ الوحيدةُ في النظامِ التي تظهرُ في تعبيرِ ثابتِ الاتِّزانِ.

تغيُّراتُ الضغطِ

يؤثِّرُ التغيُّرُ في الضغطِ فقطْ على الأنظمةِ الغازيَّةِ المتَّزنةِ. لكي تؤثِّرَ تغيُّراتُ الضغطِ على النظامِ، يتعيَّنُ أن يكونَ العددُ الكلّيُّ لمولاتِ الغازِ على الطرفِ الأيسرِ من المعادلةِ مختلفًا عن العددِ الكلّيِّ لمولاتِ الغازِ على طرفِها الأيمنِ.

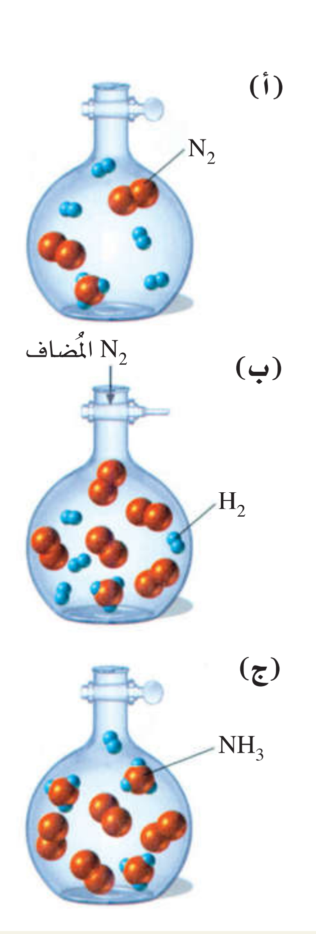
لنتأمَّلْ عمليَّةَ هابر (Haber) لتكوينِ الأمونيا. نلاحظُ أن هناك أربعةَ مولاتٍ من الغازِ على طرفِ المتفاعلاتِ من المعادلةِ، ومولَيْنِ من الغازِ على طرفِ النواتجِ لهذه المعادلةِ.

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$$

ماذا تتوقَّعُ أن يحدثَ إذا كانَ التوتُّرُ ناتجًا عن ارتفاعِ الضغطِ؟ وهل يمكنُ للنظامِ أن ينزاحَ بطريقةٍ تخفِّفُ من هذا التوتُّرِ؟ إن ارتفاعَ الضغطِ يسبِّبُ زيادةً في تراكيزِ كلِّ الأنواعِ، فيخفِّفُ النظامُ من عددِ المولاتِ، وبالتالي من الضغطِ الكلّيِّ، وذلك بانزياحِ الاتِّزانِ إلى اليمينِ. فمن كلِّ أربعةِ مولاتٍ من المتفاعلَيْنِ: النيتروجينِ والهيدروجينِ، ينتجُ مولانِ من الناتجِ، الأمونيا. فبإنتاجِ كمّيَّةٍ أكبرَ من الأمونيا، وباستهلاكِ N_2 و H_2، يمكنُ للنظامِ أن يقلِّلَ من العددِ الكلّيِّ للمولاتِ. هذا الأمرُ يؤدّي إلى انخفاضٍ في الضغطِ. وبالرغمِ من أن ضغطَ الاتِّزانِ الجديدَ لا يزالُ أعلى مما كانَ عليه من قبلُ، فإنه ليسَ بنفسِ ارتفاعِ الضغطِ الذي سبَّبَه التوتُّرُ الابتدائيُّ.

يسبِّبُ ارتفاعُ الضغطِ على الغازاتِ المحصورةِ ارتفاعًا في تراكيزِ هذه الغازاتِ. ومع أن تغيُّراتِ الضغطِ قد تزيحُ وضعَ الاتِّزانِ، فإنها لا تؤثِّرُ في قيمةِ ثابتِ الاتِّزانِ.

الأمونيا المنتَجةُ في عمليَّةِ هابر تُزالُ باستمرارٍ بتكثيفِها إلى أمونيا سائلةٍ. عمليَّةُ التكثيفِ هذهِ تُزيلُ معظمَ الناتجِ من الطورِ الغازيِّ الذي يحدثُ فيه التفاعلُ. كما أن انخفاضَ الضغطِ الجزئيِّ لغازِ الـ NH_3 في وعاءِ التفاعلِ، هو توتُّرٌ يماثلُ التوتُّرَ الذي ينشأُ من انخفاضِ تركيزِ الناتجِ الذي يزيحُ الاتِّزانَ إلى اليمينِ.



الشكل 7-4 (أ) NH_3، و H_2، و N_2 في حالةِ اتِّزانٍ في نظامٍ مغلقٍ.
(ب) إضافةُ المزيدِ من N_2 تسبِّبُ توتُّرًا يؤثِّرُ على النظامِ المتَّزنِ الأصليِّ.
(ج) الوضعُ الجديدُ لاتزانِ هذا النظامِ له تركيزٌ أعلى من التركيزِ الابتدائيِّ لـ N_2، وتركيزٌ أقلُّ لـ H_2، وتركيزٌ أعلى لـ NH_3.

ويرتفعُ الضغطُ الكلّيُّ إذا أُدخلَ غازٌ خاملٌ مثلُ الهيليوم، داخلَ وعاءِ التفاعلِ المخصَّصِ لتكوينِ الأمونيا. لكنَّ الضغوطَ الجزئيَّةَ للغازاتِ الموجودةِ في التفاعلِ لا تتغيَّرُ. لذلك فإن زيادةَ الضغطِ بإضافةِ غازٍ ليسَ متفاعلاً ولا ناتجًا لا تؤثِّرُ على وضعيَّةِ الاتِّزانِ لنظامِ التفاعلِ.

تغيُّراتُ الحرارة

التفاعلاتُ الانعكاسيَّةُ طاردةٌ للحرارةِ في أحدِ الاتِّجاهَيْن، وماصّةٌ للحرارةِ في الاتِّجاهِ الآخرِ. يعتمدُ تأثيرُ تغيُّرِ درجةِ الحرارةِ لخليطِ اتِّزانٍ على أيِّ التفاعلَيْنِ المتعاكسَين هو الماصُّ للحرارة وأيُّهما الطاردُ للحرارة.

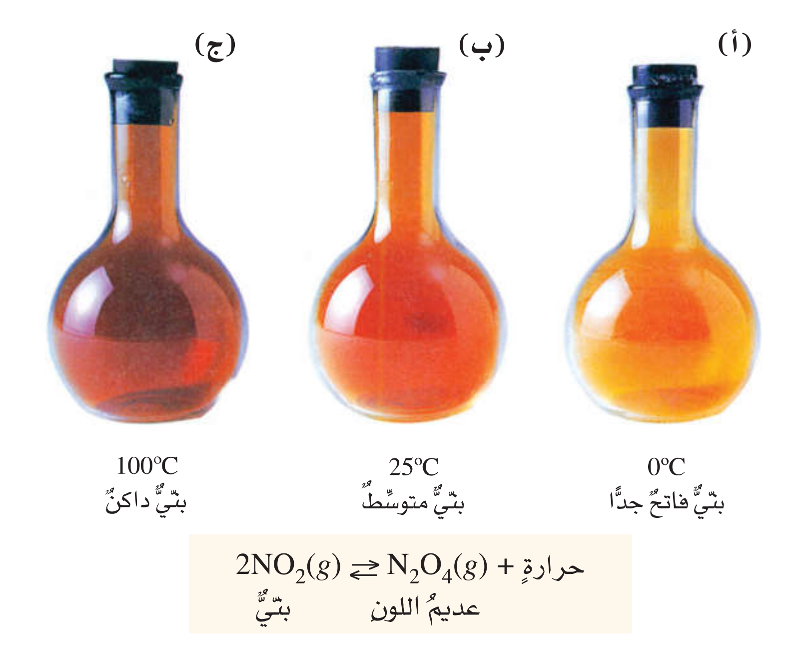
تبعًا لمبدأ لوشاتيلييه، فإنَّ إضافةَ الطاقةِ بصورةِ حرارةٍ تزيحُ الاتِّزانَ إلى الاتِّجاهِ الذي يمتصُّ الحرارةَ. وهذا يرجِّحُ التفاعلَ الماصَّ للحرارةِ. أما إزالةُ الطاقةِ فترجِّحُ التفاعلَ الطاردَ للحرارةِ. يزيدُ ارتفاعُ درجةِ الحرارةِ سرعةَ أيِّ تفاعلٍ. مع ذلكِ فلا تزيدُ سرعتا التفاعلَيْن المتعاكسَيْن في نظامٍ متَّزنٍ، بشكلٍ متساوٍ. بذلك تتأثَّرُ قيمةُ ثابتِ الاتِّزانِ، لنظامٍ معيَّنٍ، بدرجةِ الحرارةِ.

إن إنتاجَ الأمونيا من عمليَّةِ هابر طاردٌ للحرارةِ، كما تشيرُ الطاقةُ بصورةِ حرارةٍ في طرفِ النواتجِ للمعادلةِ:

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g) + 92\ kJ$$

درجةُ الحرارةِ المرتفعةُ ترجِّحُ تفكُّكَ الأمونيا، التفاعلَ الماصَّ للحرارةِ. لكنْ عندَ درجةِ حرارةٍ منخفضةٍ، يكونُ التفاعلُ الأماميُّ شديدَ البطءِ وغيرَ مفيدٍ تجاريًّا. فالحرارةُ المستخدَمةُ تمثِّلُ حلاً وسطًا بينَ متطلَّباتِ ديناميكيَّةِ التفاعلِ والاتِّزانِ. فهي مرتفعةٌ بما يكفي لسرعةِ الوصولِ إلى الاتِّزانِ، لكنَّها منخفضةٌ بما يكفي لكي يكونَ تركيزُ الأمونيا عندَ الاتِّزانِ مهمًّا. فدرجةُ حرارةٍ معتدلةٍ (حوالي 500°C) وضغطٍ مرتفعٍ جدًّا (1000-700 atm) كفيلانِ بإنتاجِ مردودٍ مناسبٍ من الأمونيا.

كذلك يعدُّ إنتاجُ غازِ رُباعي أكسيدِ النيتروجينِ الثنائيِّ، العديمِ اللونِ N_2O_4 من غازِ NO_2، البنّيِّ الداكنِ، تفاعلاً طاردًا للحرارةِ. يبيِّنُ الشكلُ 7-5 كيف تؤثِّرُ درجةُ الحرارةِ على اتِّزانِ هذا النظامِ. يبيِّنُ الشكلُ 7-5(ب) خليطَ الاتِّزانِ NO_2/N_2O_4 عندَ درجةِ حرارة 25°C. فإذا خفِّضَتْ درجةُ حرارةِ النظامِ إلى 0°C، فإن النظامَ يتعرَّضُ لتوتُّرٍ (إزالةِ الطاقةِ بصورةِ حرارةٍ). لتعديلِ هذا التوتُّرِ ينزاحُ النظامُ إلى اليمينِ، أو إلى اتِّجاهِ التفاعلِ الطاردِ للحرارةِ. هذا الانزياحُ يزيدُ من كمّيةِ غازِ الـ N_2O_4 عديمِ اللونِ، ويخفِّضُ كمّيَّةَ غازِ الـ NO_2 البنّيِّ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 7-5(أ). وبما أن كمّيةً أكبرَ من N_2O_4 عديمِ اللونِ توجدُ في الخليطِ، فقدِ ارتفعَتْ قيمةُ K. عندَما يسخَّنُ النظامُ إلى 100°C، يتمثَّلُ التوتُّرُ بالطاقةِ المضافةِ، فينزاحُ الاتِّزانُ إلى اليسارِ، أو إلى اتِّجاهِ التفاعلِ الماصِّ للحرارةِ. هذا الانزياحُ يخفِّضُ كمّيَّةَ الغازِ N_2O_4 عديمِ اللونِ ويزيدُ كمّيَّةَ الغازِ NO_2 البنّيِّ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 7-5(ج). وبما أنَّ كمّيةً أقلَّ من الـ N_2O_4 توجدُ في



الشكل 5-7 يمكنُ لدرجاتِ الحرارةِ المختلفةِ أن تسبِّبَ انزياحًا لنظامٍ متّزنٍ، من أجلِ الوصولِ إلى حالةِ اتزانٍ جديدٍ.

$$2NO_2(g) \rightleftharpoons N_2O_4(g) + \text{حرارةٍ}$$

بنّيٌّ   عديمُ اللونِ

الخليطِ، فقد انخفضَتْ قيمةُ K. إنَّ تغيُّرَ درجةِ الحرارةِ يغيِّرُ قيمةَ K. هذا يعني أن النظامَ الذي يكونُ تفاعلُه الأماميُّ طاردًا للحرارةِ، تنخفضُ قيمةُ ثابتِهِ K بارتفاعِ درجةِ الحرارةِ.

أما التفاعلُ الماصُّ للحرارةِ كتفكُّكِ كربوناتِ الكالسيومِ، ففيهِ تظهرُ الطاقةُ بشكلِ حرارةٍ في طرفِ المتفاعلاتِ للمعادلةِ.

$$556\ kJ + CaCO_3(s) \rightleftharpoons CaO(s) + CO_2(g)$$

إن ارتفاعَ درجةِ الحرارةِ الذي تسبِّبُهُ إضافةُ الطاقةِ إلى النظامِ يسبِّبُ زيادةً في K، وانزياحًا للاتِّزانِ إلى اليمينِ.

يمكنُ تسريعُ تفاعلَيِ النظامِ أيضًا بواسطةِ حفّازٍ مناسبٍ. غير أن الحفّازاتِ لا تؤثِّرُ على الكمّيّاتِ النسبيّةِ عند الاتِّزانِ. فهي تؤثِّرُ فقطْ في السرعاتِ التي سبَّبَتِ الوصولَ إلى الاتِّزانِ. يُعزى ذلك إلى أن الحفّازاتِ تزيدُ سرعتَيِ التفاعلَيْنِ الأماميِّ والعكسيِّ، في نظامٍ معيَّنٍ، بمعاملاتٍ متساويةٍ. لذلك لا تؤثِّرُ هذهِ الحفّازاتُ في K.

التفاعلاتُ التي تتَّجهُ إلى الاكتمالِ

تبدو بعضُ التفاعلاتِ، التي تتضمَّنُ مركَّباتٍ تتكوَّنُ من تفاعلٍ بينَ الأيوناتِ في المحاليلِ، أنها تتَّجهُ إلى الاكتمالِ، بحيثُ تزولُ الأيوناتُ من المحلولِ بشكلٍ شبهِ تامٍّ. ويعتمدُ مدى استهلاكِ (إزالةِ) الأيوناتِ المتفاعلةِ من المحلولِ على ذوبانيّةِ المركَّبِ الناتجِ وعلى درجةِ تأيُّنِه. هكذا فإنَّ الناتجَ، الذي ينفلتُ كغازٍ أو يترسَّبُ كمادَّةٍ صلبةٍ، أو يتأيَّنُ بشكلٍ طفيفٍ فقطْ، يزيلُ كمّيَّةً كبيرةً من الأيوناتِ المتفاعلةِ التي تكوِّنُ هذا الناتجَ. لنتأمَّلْ بعضَ الأمثلةِ على حالاتٍ تتَّجهُ فيها التفاعلاتُ بين الأيوناتِ إلى الاكتمالِ.

تكوُّنُ غاز

تتفكَّكُ تلقائيًّا الموادُّ غيرُ المستقرَّةِ الناتجةُ عن تفاعلاتٍ أيونيَّةٍ. فمثلاً حمضُ الكربونيكِ، H_2CO_3 يتفكَّكُ في المشروباتِ المكربنةِ لينتجَ غازًا.

$$H_2CO_3(aq) \rightarrow H_2O(l) + CO_2(g)$$

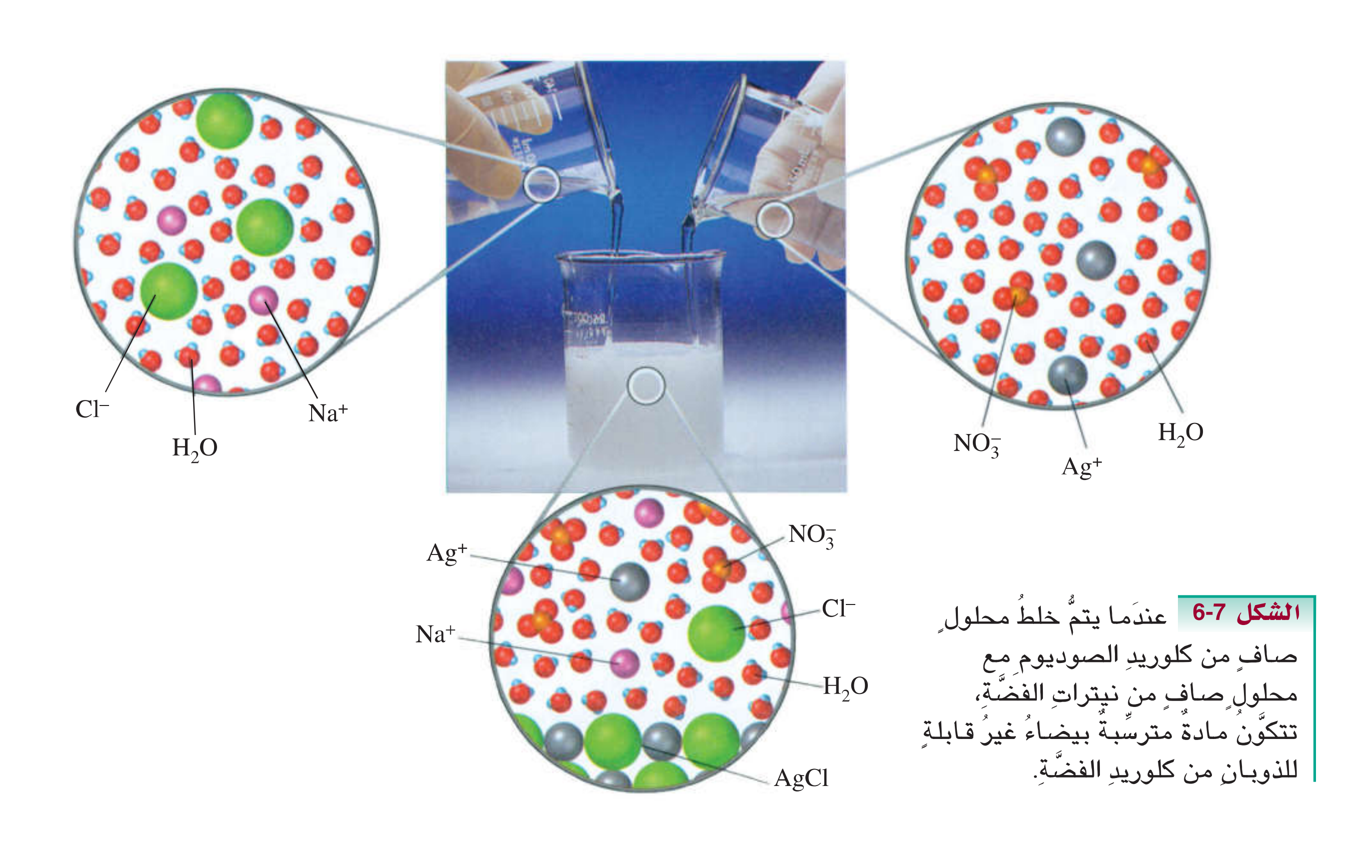
هذا التفاعلُ يحدثُ عمليًّا حتى الاكتمال، لأن واحدًا من نواتجِه، CO_2، ينفلتُ كغازٍ إذا كانَ الوعاءُ مفتوحًا.

تكوُّنُ مادّةٍ مترسِّبةٍ

عندَما يُخلطُ محلولانِ من كلوريدِ الصوديوم ونيتراتِ الفضَّةِ، تتكوَّنُ في الحالِ مادَّةٌ مترسِّبةٌ بيضاءُ من كلوريدِ الفضَّةِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 7-6.
المعادلةُ الأيونيةُ العامَّةُ لهذا التفاعلِ هي:

$$Na^+(aq) + Cl^-(aq) + Ag^+(aq) + NO_3^-(aq) \rightarrow Na^+(aq) + NO_3^-(aq) + AgCl(s)$$

فإذا خُلطَتْ كمِّيّاتٌ متعادلةٌ كيميائيًّا من المذابَيْن، يبقى في المحلولِ الأيوناتُ Na^+ و NO_3^- فقطْ بكمِّياتٍ مهمَّةٍ. وتنفصلُ من المحلولِ تقريبًا أيوناتُ كلٍّ من Ag^+، و Cl^- التي تكوِّنُ مادَّةً مترسِّبةً، هي $AgCl$. وسببُ ذلك أن قابليَّةَ ذوبانِ الـ $AgCl$ في الماءِ ضئيلةٌ جدًّا. لذلك ينفصلُ $AgCl$ بالترسُّبِ من المحلولِ الذي أصبحَ مشبعًا به. هكذا يسيرُ هذا التفاعلُ نحوَ الاكتمال، لأن ناتجًا غيرَ قابلٍ للذوبانِ بشكلٍ أساسيٍّ، قد تكوَّنَ.



الشكل 7-6 عندَما يتمُّ خلطُ محلولٍ صافٍ من كلوريدِ الصوديوم مع محلولٍ صافٍ من نيتراتِ الفضَّةِ، تتكوَّنُ مادةٌ مترسِّبةٌ بيضاءُ غيرُ قابلةٍ للذوبانِ من كلوريدِ الفضَّةِ.

تكوُّنُ ناتجٍ ضعيفِ التأيُّن

تؤدّي تفاعلاتُ التعادلِ بين أيوناتِ H_3O^+ من محاليلِ الأحماض، وأيوناتِ OH^- من محاليلِ القواعدِ، إلى تكوُّنِ جزيئاتِ الماءِ، التي تتأيَّنُ بضعفٍ شديدٍ. ويوضِّحُ هذهِ العمليَّةَ التفاعلُ بين HCl و NaOH. والواقعُ أنَّ محلولَ HCl يزوِّدُ المحلولَ بأيوناتِ H_3O^+ و Cl^-. ويزوِّدُهُ محلولُ NaOH بأيوناتِ Na^+ و OH^-، كما تظهرُ المعادلةُ الأيونيَّةُ التاليةُ:

$$H_3O^+(aq) + Cl^-(aq) + Na^+(aq) + OH^-(aq) \rightarrow Na^+(aq) + Cl^-(aq) + 2H_2O(l)$$

حذفُ الأيوناتِ المتفرِّجةِ يؤدّي إلى المعادلةِ الأيونيَّةِ الصرفةِ التاليةِ:

$$H_3O^+(aq) + OH^-(aq) \rightarrow 2H_2O(l)$$

وبما أنَّ الماءَ ضعيفُ التأيُّنِ، فإن معظمَه تقريبًا يوجدُ على شكلِ جزيئاتٍ. وهكذا، عندما توجدُ أيوناتُ الهيدرونيومِ وأيوناتُ الهيدروكسيدِ بكمِّيّاتٍ ابتدائيَّةٍ متساويةٍ، تزولُ بشكلٍ شبهِ تامٍّ من المحلولِ. ويسيرُ التفاعلُ إلى الاكتمالِ، لأن الناتجَ يتأيَّنُ بشكلٍ ضعيفٍ.

تأثيرُ الأيونِ المشتَرَكِ

بتطبيقِ مبدأ لو شاتيلييه يمكنُ لتفاعلٍ متَّزنٍ أن يُزاحَ نحوَ الاتِّجاهِ المرغوبِ. لنفترضْ أنَّ غازَ كلوريدِ الهيدروجينِ قد أُضيفَ إلى محلولٍ مشبعٍ من كلوريدِ الصوديوم. فكلوريدُ الهيدروجينِ قابلٌ للذوبانِ بشكلٍ كبيرٍ، ويتأيَّنُ بشكلٍ تامٍّ.

$$HCl(g) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + Cl^-(aq)$$

وتصفُ المعادلةُ التاليةُ اتِّزانَ محلولِ كلوريدِ الصوديومِ المشبعِ.

$$NaCl(s) \rightleftarrows Na^+(aq) + Cl^-(aq)$$

فعندَما يذوبُ كلوريدُ الهيدروجين بكمِّيَّةٍ كافيةٍ، يزيدُ من تركيزِ أيوناتِ الـ Cl^- في المحلولِ. تسبِّبُ هذه الزيادةُ توتُّرًا للنظامِ المتَّزنِ. وتبعًا لمبدأ لو شاتيلييه، فإن إزالةَ هذا التوتُّرِ تتمُّ باتِّحادِ كمّيَّةٍ من أيوناتِ Cl^- المضافةِ، مع كمّيَّةٍ مكافئةٍ من أيوناتِ Na^+. يؤدّي هذا إلى ترسُّبِ كمِّيَّةٍ من NaCl الصلبِ، الذي يعملُ على إزالةِ التوتُّرِ الناتجِ عن الكلوريدِ المضافِ. أما الاتِّزانُ الجديدُ، فيتَّصفُ بتركيزٍ أعلى من أيوناتِ الكلوريدِ، لكن بتركيزٍ أقلَّ من أيونات Na^+. مع ذلك يبقى حاصلُ ضربِ $[Na^+]$ و $[Cl^-]$ محافظًا على قيمتِهِ السابقةِ. ***هذه الظاهرةُ، التي تسبِّبُ خلالَها إضافةُ أيونٍ مشتركٍ بين مذابَيْنِ، ترسُّبًا أو تقليلاً للتأيُّنِ، هي مثالٌ على تأثيرِ الأيونِ المشترَكِ*** **common-ion effect**.

يلاحَظُ تأثيرُ الأيونِ المشتركِ أيضًا عندَما يضافُ واحدٌ من أيوناتِ إلكتروليتٍ ضعيفٍ إلى محلولٍ معيَّنٍ. فمثلاً حمضُ الأسيتيك، CH_3COOH، هو إلكتروليتٌ من هذا النوعِ. فمحلولٌ من $0.1\ M\ CH_3COOH$ يتأيَّنُ بنسبةِ 1.3% تقريبًا لينتجَ أيوناتِ الهيدرونيوم H_3O^+ وأيوناتِ الأسيتاتِ، CH_3COO^-. المعادلةُ التاليةُ تُبيِّنُ الاتِّزانَ الأيونيَّ.

$$CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$$

إن إضافةَ كمِّيّاتٍ قليلةٍ من أسيتاتِ الصوديوم (ملح أيونيٌّ يتفكَّكُ بشكلٍ تامٍّ في الماءِ) إلى محلولٍ يحتوي على حمضِ الأسيتيكِ تزيدُ من تركيزِ أيونِ الأسيتاتِ. بذلك ينزاحُ الاتّزانُ إلى الاتّجاهِ الذي يستهلكُ بعضًا من أيوناتِ الأسيتاتِ، تبعًا لمبدأ لو شاتيلييه. فيتكوَّنُ عددٌ أكبرُ من جزيئاتِ حمضِ الأسيتيكِ وينخفضُ تركيزُ أيوناتِ الهيدرونيوم. بشكلٍ عامٍّ، فإنَّ إضافةَ ملحٍ، يحتوي على أيونٍ مشتركٍ، إلى محلولِ إلكتروليتٍ ضعيفٍ، تقلِّلُ من تأيُّنِ هذا الإلكتروليتِ. يبيِّنُ الشكلُ 7-7 محلولَيْنِ هما: $0.25\ M\ CH_3COOH$ إلى اليسار، ولهُ قيمةُ pH 2.7، و $0.10\ M\ CH_3COONa$ في الوسطِ. بخلطِ هذَيْنِ المحلولَيْنِ ينتجُ المحلولُ الظاهرُ إلى اليمينِ ولهُ قيمةُ pH 4.5، ممّا يشيرُ إلى انخفاضِ $[H_3O^+]$، وبالتالي إلى تأيُّنٍ أقلَّ لحمضِ الأسيتيكِ.

الشكل 7-7 يُخلطُ محلولُ CH_3COOH إلى اليسارِ معَ محلولِ CH_3COONa في الوسطِ. المحلولان يحتويان على الأيونِ المشتركِ، CH_3COO^-. ينتجُ عن خلطِ المحلولَيْنِ المحلولُ الموجودُ إلى اليمينِ، والذي يتميَّزُ بحمضيَّةٍ قليلةٍ، ناتجةٍ عن انخفاضِ التأيُّنِ لهذا الحمضِ. ألوانُ هذه المحاليل ناتجةٌ عن إضافةِ كواشفِ حمضٍ–قاعدةٍ.

مراجعةُ القسمِ 2-7

1. اذكرْ ثلاثَ طرقٍ تسبِّبُ اضطرابًا للاتّزانِ الكيميائيِّ.

2. صِفْ ثلاثَ حالاتٍ تصلُ فيها التفاعلاتُ الأيونيَّةُ إلى الاكتمالِ.

3. صفْ تأثيرَ الأيونِ المشتركِ.

4. حدِّدْ هويةَ الأيونِ المشترَكِ في كلٍّ من الحالاتِ الآتية:

أ. إضافةُ 5 g من NaCl إلى محلولِ 2.0 M HCl.

ب. إضافةُ 50 mL من محلولِ $1.0\ M\ CH_3COONa$ إلى محلولِ $1.0\ M\ CH_3COOH$.

ج. إضافةُ 10 حبّاتٍ من NaOH إلى 100 mL من الماءِ.

5. توقَّعْ تأثيرَ تقليلِ الضغطِ على الأنظمةِ المتّزنةِ التاليةِ:

أ. $H_2(g) + Cl_2(g) \rightleftarrows 2HCl(g)$

ب. $NH_4Cl(s) \rightleftarrows NH_3(g) + HCl(g)$

ج. $2H_2O_2(aq) \rightleftarrows 2H_2O(l) + O_2(g)$

د. $3O_2(g) \rightleftarrows 2O_3(g)$

تفكيرٌ ناقد

6. توقُّعُ نتائج: يتفاعلُ ثنائي أكسيدِ الكربون مع الماءِ، ليكوِّنا أيونَ البيكربوناتِ وأيونَ الهيدرونيوم. يؤدّي التنفُّسُ السريعُ إلى زفيرِ كمّيَّةٍ من ثنائي أكسيدِ الكربون أكبرَ من المعتادِ. كيف يؤثِّرُ التنفُّسُ السريعُ على pH الدمِ؟ وضِّحْ إجابتك.

القسم 3-7

الاتِّزانُ في محاليل الأحماضِ والقواعدِ والأملاحِ

مؤشّراتُ الأداءِ

- يوضّحُ مفهومَ ثابتِ تأيُّنِ الأحماضِ. يكتبُ تعبيرَ ثابتِ الاتّزانِ للأحماضِ.
- يفسّرُ عملَ المحاليل المنظَّمة.
- يقارنُ بينَ التحلل المائي للكاتيون والتحلل المائي للأنيون.

ثابتُ تأيُّنِ الحمضِ الضعيفِ، K_a

حوالي 1.3% من جزيئاتِ المذابِ في محلولِ حمضِ الأسيتيكِ 0.1 M متأيّنةٌ عندَ درجةِ حرارةِ الغرفةِ. النسبةُ الباقيةُ 98.7% من جزيئاتِ حمضِ الأسيتيكِ، CH_3COOH، تبقى غيرَ متأيّنةٍ. بذلك يحتوي المحلولُ على ثلاثةِ أنواعٍ من الجسيماتِ في حالةِ الاتّزانِ هي: جزيئاتُ CH_3COOH، وأيوناتُ H_3O^+، وأيوناتُ الأسيتات، CH_3COO^-. لذلك يمكنُ كتابةُ تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ، من خلالِ معادلةِ الاتّزانِ، لتأيُّنِ حمضِ الأسيتيكِ.

$$CH_3COOH + H_2O \rightleftarrows H_3O^+ + CH_3COO^-$$

$$K = \frac{[H_3O^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH][H_2O]}$$

من الجدير بالملاحظةِ أن تركيزَ الماءِ لا يدخلُ في تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ. وبما أن الماءَ هو المذيبُ، وبما أنَّ عددَ جزيئاتِ الماءِ يزيدُ كثيرًا عن عددِ جزيئاتِ حمضِ الأسيتيكِ، ودونَ التسبُّبِ في أيِّ خطأ مقيسٍ، فيمكنُ أن نفترضَ أن تركيزَ جزيئاتِ الماءِ يبقى ثابتًا في محلولٍ كهذا، بذلك يكونُ الحاصلُ $K[H_2O]$ ثابتًا، لأنّ K و $[H_2O]$ ثابتان.

$$K[H_2O] = \frac{[H_3O^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH]}$$

يمكنُ تبسيطُ الطرفِ الأيسرِ من المعادلةِ باعتبارِ $K_a = K[H_2O]$

$$K_a = \frac{[H_3O^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH]}$$

يُسمَّى الثابتُ K_a ثابتَ تأيُّنِ الحمضِ* acid ionization constant، *ويُعرفُ على أنه ثابتُ الاتّزانِ لتفاعلِ تأيُّنِ الحمضِ. ثابتُ تأيُّنِ الحمضِ، K_a، كثابتِ الاتّزانِ، K، يكونُ ثابتًا عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، لكنّه يكتسبُ قيمةً جديدةً عندَ كلِّ درجةِ حرارةٍ جديدةٍ.

يمثّلُ ثابتُ تأيُّنِ الحمضِ الضعيفِ، قيمةً صغيرةً. لتحديدِ القيمةِ الرقميَّةِ لثابتِ تأيُّنِ حمضِ الأسيتيكِ عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، تلزمُ معرفةُ التراكيزِ عند الاتّزانِ لكلٍّ من أيوناتِ H_3O^+، و CH_3COO^-، ولجزيئاتِ CH_3COOH. وبما أن تأيُّنَ جزيءٍ من CH_3COOH في الماءِ ينتجُ أيونًا من H_3O^+ وأيونًا من CH_3COO^-، فيمكنُ إيجادُ هذه التراكيزِ عمليًّا بقياسِ pH للمحلولِ.

الجدول 7-2 تأيُّنُ حمضِ الأسيتيكِ

المولاريَّة	% للتأيُّن	$[H_3O^+]$	$[CH_3COOH]$	K_a
0.100	1.33	0.00133	0.0987	1.79×10^{-5}
0.0500	1.89	0.000945	0.0491	1.82×10^{-5}
0.0100	4.17	0.000417	0.00958	1.81×10^{-5}
0.00500	5.86	0.000293	0.00471	1.82×10^{-5}
0.00100	12.6	0.000126	0.000874	1.82×10^{-5}

يُظهرُ الجدولُ 7-2 بياناتِ التأيُّنِ والثوابتَ لبعضِ المحاليلِ المخفَّفةِ لحمضِ الأسيتيكِ عند 25°C. لاحظْ أن القيمةَ الرقميَّةَ لـ K_a شبهُ متطابقةٍ لكلِّ محلولٍ مولاريتُهُ مبيَّنةٌ. يمكنُ تحديدُ قيمةِ K_a الرقميَّةِ لـ CH_3COOH عندَ 25°C، بأن تُستبدلَ بالتراكيزِ قيمُها الرقميَّةُ في تعبيرِ ثابتِ الاتِّزانِ.

$$K_a = \frac{[H_3O^+][CH_3COO^-]}{[CH_3COOH]}$$

عندَ درجةِ حرارةٍ ثابتةٍ، تسبِّبُ زيادةُ تركيزِ أيوناتِ CH_3COO^-، بإضافةِ أسيتاتِ الصوديوم، CH_3COONa، اضطرابًا للاتِّزان، كما يتوقَّعُ مبدأُ لو شاتيلييه. يسبِّبُ هذا الاضطرابُ بدورِهِ انخفاضًا في $[H_3O^+]$ وزيادةً في $[CH_3COOH]$. في نهايةِ الأمرِ، يتحقَّقُ الاتِّزانُ من جديدٍ دون تغيُّرٍ في قيمةِ K_a، لكن بتركيزٍ أعلى لجزيئاتِ حمضِ الأسيتيكِ غيرِ المتأيِّنِ وبتركيزٍ أقلَّ لأيوناتِ H_3O^+ ممّا كانَتْ عليه قبلَ إضافةِ CH_3COO^-. وتؤثِّرُ تغيُّراتُ تركيزِ أيونِ الهيدرونيوم على pH. في هذا المثالِ، يعني انخفاضُ $[H_3O^+]$ زيادةً في pH المحلولِ.

(أ)

(ب)

الشكل 7-8 (أ) تحتوي الكأسُ الزجاجيَّةُ اليسرى على محلولٍ منظَّمٍ وكاشفٍ يدلُّ على pH = 5 تقريبًا. أما الكأسُ اليمنى فتحتوي على ماءٍ، وعلى مقدارٍ ضئيلٍ من الحمضِ، وعلى كاشفٍ. يبيِّنُ مقياسُ pH أنَّ pH = 5.00 لهذا المحلولِ.
(ب) بعدَ إضافةِ 5 mL من محلولِ 0.10 M HCl إلى الكأسَيْنِ، لا يتغيَّرُ لونُ المحلولِ في الكأسِ اليُسرى، ما يدلُّ على أن قيمةَ pH في هذه الكأسِ لم تتغيَّرْ بشكلٍ ملموسٍ. أما الكأسُ اليمنى فيتغيَّرُ لونُ المحلولِ فيها، ويظهرُ مقياسُ pH أن pH = 2.17.

المحاليلُ المنظّمةُ

يحتوي المحلولُ السابقُ على حمضٍ ضعيفٍ، CH_3COOH، وعلى ملحِ هذا الحمضِ الضعيفِ CH_3COONa. لذلك يمكنُ للمحلولِ أن يتفاعلَ إما مع حمضٍ وإما مع قاعدةٍ. عندما تضافُ كمّيّاتٌ قليلةٌ من أحماضٍ أو قواعدَ، يبقى pH المحلولِ شبهَ ثابتٍ. فالحمضُ الضعيفُ والأيونُ المشترَكُ CH_3COO^-، يعملانِ كمحلولٍ منظّمٍ لـ pH المحلولِ، وبما أنه ***يقاومُ تغيُّراتِ pH فإنَّ هذا المحلولَ هو محلولٌ منظّمٌ*** **buffer solution**. يبيِّنُ الشكلُ 7-8 كيفَ يتفاعلُ المحلولُ المنظّمُ والمحلولُ غيرُ المنظّمِ عندَ إضافةِ حمضٍ.

لنفترضْ أن كمِّيَّةً قليلةً من الحمضِ أُضيفَتْ إلى محلولِ حمضِ الأسيتيك–أسيتاتِ الصوديوم. تتفاعلُ أيوناتُ الأسيتاتِ مع معظمِ أيوناتِ الهيدرونيومِ المضافةِ، لتكوِّنَ

جزيئاتٍ غيرَ متأيِّنةٍ من حمضِ الأسيتيكِ.

$$CH_3COO^-(aq) + H_3O^+(aq) \rightarrow CH_3COOH(aq) + H_2O(l)$$

عمليًّا، يبقى تركيزُ أيونِ الهيدرونيومِ و pH المحلولِ ثابتَين.

لنفترضْ أن كمّيّةً قليلةً من قاعدةٍ أضيفَتْ إلى المحلولِ الأصليّ. تتفاعلُ أيوناتُ OH^- مع أيوناتِ H_3O^+ وتزيلُها، لتكوِّنَ جزيئاتِ الماءِ غيرِ المتأيِّنةِ. بالمقابلِ تتأيَّنُ جزيئاتُ حمضِ الأسيتيكِ، للتعويضِ عن أيوناتِ الهيدرونيومِ التي تمَّتْ معادلتُها بأيوناتِ OH^- المضافةِ.

$$CH_3COOH(aq) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + CH_3COO^-(aq)$$

هنا أيضًا يبقى pH المحلولِ ثابتًا عمليًّا.

كذلك يتميَّزُ محلولُ قاعدةٍ ضعيفةٍ، يحتوي على ملحِ هذه القاعدةِ، بسلوكٍ مشابهٍ، فيبقى تركيزُ أيونِ الهيدروكسيدِ و pH المحلولِ ثابتَيْن، عندَ إضافةِ كمّيّاتٍ قليلةٍ من الأحماضِ أو القواعدِ. لنفترضْ أن قاعدةً أضيفَتْ إلى محلولِ الأمونيا، الذي يحتوي أيضًا على كلوريدِ الأمونيوم. تمنحُ أيوناتُ الأمونيومِ بروتونًا لأيوناتِ الهيدروكسيدِ المضافةِ، لتكوِّنَ جزيئاتٍ غيرَ متأيِّنةٍ من الماءِ.

$$NH_4^+(aq) + OH^-(aq) \rightarrow NH_3(aq) + H_2O(aq)$$

وإذا أضيفَتْ كمّيَّةٌ من حمضٍ إلى المحلولِ، فإن أيوناتِ الهيدروكسيدِ من المحلولِ تستقبلُ بروتوناتٍ من أيوناتِ الهيدرونيومِ المضافةِ، لتكوِّنَ جزيئاتٍ غيرَ متأيِّنةٍ من الماءِ. إذ ذاك تتأيَّنُ جزيئاتُ الأمونيا في المحلولِ، وتعوِّضُ عن معظمِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ التي تمَّتْ معادلتُها بأيوناتِ H_3O^+.

$$NH_3(aq) + H_2O(l) \rightarrow NH_4^+(aq) + OH^-(aq)$$

للمحاليلِ المنظَّمةِ تطبيقاتٌ عديدةٌ ومهمَّةٌ في الكيمياءِ والفيسيولوجيا. فدمُ الإنسانِ يحافظُ طبيعيًّا على pH بين 7.3 و 7.5. هذا الأمرُ أساسيٌّ لأن تغيُّراتٍ كبيرةً في pH الدمِ قد تؤدّي إلى اضطراباتٍ قويَّةٍ في وظائفِ الجسمِ العاديَّةِ. يبيِّنُ الشكلُ 7-9 مثالاً على واحدٍ من أدويةٍ كثيرةٍ تحتوي على محاليلَ منظّمةٍ، لمنعِ تغيُّراتٍ كبيرةٍ وضارَّةٍ في pH الدمِ.

الشكل 7-9 منتجاتٌ استهلاكيَّةٌ كثيرةٌ تدخلُ في تكوينِها محاليلُ منظمةٌ، وذلك لحمايةِ الجسمِ من تغيُّراتِ pH الضارَّةِ.

ثابتُ تأيُّنِ الماءِ

تذكرُ من الفصلِ 4، أن التأيُّنَ الذاتيَّ للماءِ هو تفاعلُ اتِّزانٍ:

$$H_2O(l) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + OH^-(aq)$$

يتحقَّقُ الاتِّزانُ بتركيزٍ منخفضٍ جدًّا لأيوناتِ H_3O^+ و OH^-. وتعبيرُ ثابتِ الاتِّزانِ يشتقُّ من المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ:

$$K_w = [H_3O^+][OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$$

التحلل المائي للأملاح

تتكوَّنُ الأملاحُ خلالَ تفاعلِ التعادلِ بينَ حمضِ برونشتد وقاعدةِ برونشتد. وعندَما يذوبُ ملحٌ في الماءِ، ينتجُ الأيوناتِ الموجبةَ (الكاتيونات) للقاعدةِ التي تكوَّنَ منها الملحُ، والأيوناتِ السالبةَ (الأنيونات) للحمضِ الذي تكوَّنَ منه الملحُ. يُتوقَّعُ أن يكونَ المحلولُ متعادلاً. والحقيقةُ أن المحاليلَ المائيَّةَ لبعضِ الأملاحِ، مثل NaCl و KNO_3، متعادلةٌ، و pH لهذهِ المحاليلِ 7. غيرَ أن المحلولَ الناتجَ من ذوبانِ كربوناتِ الصوديومِ في الماءِ يحوِّلُ ورقَ تبّاعِ الشمسِ الأحمرِ إلى الأزرقِ، مُشيرًا بذلك إلى أن قيمةَ pH أكبرُ من 7. كذلكَ ينتجُ كلوريدُ الأمونيومِ محلولاً يحوِّلُ ورقَ تبّاعِ الشمسِ الأزرقَ إلى أحمرَ، مشيرًا إلى أن قيمةَ pH أقلُّ من 7. والشكلُ 7-10 يُظهرُ الأملاحَ المتكوِّنةَ من اتِّحادِ أحماضٍ وقواعدَ قويَّةٍ أو ضعيفةٍ.

يُمكنُ تفسيرُ تغيُّراتِ قيمِ pH بفحصِ الأيوناتِ المكوَّنةِ، عندَما يتفكَّكُ كلٌّ من هذهِ الأملاحِ. فإذا كانَتْ هذهِ الأيوناتُ مصدرُها أحماضٌ أو قواعدُ ضعيفةٌ، فهي تتفاعلُ كيميائيًّا مع جزيئاتِ الماءِ، وسوفَ يكونُ pH المحلولِ ذا قيمةٍ مختلفةٍ عن 7. ***إن التفاعلَ بين جزيئاتِ الماء وأيوناتِ الملحِ الذائبِ هو التحلل المائي hydrolysis***. وإذا تفاعلَتِ الأنيوناتُ مع الماءِ، فالعمليَّةُ هي التحلل المائي للأنيوناتِ، وهي تنتجُ محلولاً أكثرَ قاعديَّةً. وإذا تفاعلتِ الكاتيوناتُ مع جزيئاتِ الماءِ، فالعمليّةُ هي التحلل المائي للكاتيوناتِ، وهي تنتجُ محلولاً أكثرَ حمضيَّةً.

التحلل المائي للأنيونِ

وفقًا لمفهومِ برونشتد، يكونُ أنيونُ الملحِ القاعدةَ المرافقةَ للحمضِ الذي تكوَّنَ منه الملحُ، فهو إذن مستقبِلٌ للبروتون. وإذا كانَ الحمضُ ضعيفًا، تكونُ القاعدةُ المرافقةُ (الأنيون) قويَّةً بما يكفي لاستقبالِ البروتوناتِ من بعضِ جزيئاتِ الماءِ، المانحةِ للبروتون،

(أ)

(ب)

(ج)

(د)

الشكل 7-10 لونُ الكاشفِ العامِّ يبيِّنُ أن pH لمحاليلِ الأملاحِ تتباينُ بحسبِ قوةِ الحمضِ والقاعدة اللتَيْن تكوِّنان الملحَ. (أ) يتكوَّنُ NaCl من حمضٍ قويٍّ وقاعدةٍ قوية؛ لونُ الكاشفِ يبيِّنُ أن الـ pH متعادلٌ. (ب) يبيِّنُ الكاشفُ أن pH لمحلولِ أسيتاتِ الصوديوم قاعديٌّ، فأسيتاتِ الصوديوم تكوَّنَتْ من قاعدةٍ قويةٍ وحمضٍ ضعيف. (ج) تفاعلُ الحمضِ القويِّ والقاعدةِ الضعيفةِ لتكوين كلوريدِ الأمونيوم، ينتجُ محلولاً حمضيًّا، كما يبيّنُ لونُ الكاشفِ المائلِ إلى الاحمرار. (د) الحمضُ الضعيفُ والقاعدةُ الضعيفةُ اللذان يكوِّنانِ أسيتاتِ الأمونيوم، لهما قوى متقاربةٌ. لذلك يبدو محلولُ أسيتاتِ الأمونيومِ متعادلاً.

لتكوّنَ أيونات OH^-، يتحقَّقُ اتِّزانٌ يكونُ فيه التأثيرُ النهائيُّ للتّحلل المائي للأنيونِ زيادةً في تركيزِ أيونِ الهيدروكسيدِ، $[OH^-]$، في المحلولِ.

معادلةُ الاتِّزانِ لحمضٍ ضعيفٍ افتراضيٍّ، HA، في الماءِ لتكوينِ أيونِ الهيدرونيومِ والأنيون، A^-، هي التاليةُ:

$$HA(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + A^-(aq)$$

انطلاقًا من هذه المعادلةِ، يمكنُ كتابةُ التعبيرِ العامِّ لـ K_a. لاحظْ أن الماءَ لا يظهرُ في التعبيرِ العامِّ للاتِّزانِ، كما في حالاتٍ سابقةٍ.

$$K_a = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA]}$$

يتمثَّلُ تفاعلُ التحلل المائي للأنيونِ، A^-، المتكوِّنِ من تأيُّنِ الحمضِ الضعيفِ HA، بمعادلةِ الاتِّزانِ العامَّةِ التاليةِ:

$$A^-(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows HA(aq) + OH^-(aq)$$

في التفاعلِ الأماميِّ، يكسبُ الأنيونُ، A^-، بروتونًا من جزيءِ الماءِ، ليكوِّنَ الحمضَ الضعيفَ HA، وأيونَ الهيدروكسيدِ، OH^-. يعتمدُ مدى تكوُّنِ الأيونِ OH^- ووضعُ الاتِّزانِ على القوةِ النسبيَّةِ للأنيونِ A^-. فبقدرِ ما تكونُ قيمةُ K_a لـ HA منخفضةً، يكونُ جذبُ A^- للبروتوناتِ أقوى، مقارنةً مع OH^-. ويكونُ إنتاجُ OH^- أكبرَ. أي بقدرِ ما يكونُ الحمضُ HA ضعيفًا، تكونُ قاعدتُه المرافقةُ، A^-، قويَّةً.

إن المحاليلَ المائيَّةَ لكربوناتِ الصوديومِ قاعديَّةٌ. فأيوناتُ الصوديومِ، Na^+ في كربوناتِ الصوديومِ، لا تخضعُ لتفاعلِ التحلل في المحلولِ المائيِّ. لكنَّ أيوناتِ الكربوناتِ CO_3^{2-} تتفاعلُ كقاعدةِ برونشتد. يكتسبُ أنيونُ CO_3^{2-} بروتونًا من جزيءِ الماءِ، ليكوِّنَ أيونَ الكربوناتِ الهيدروجينيَّةِ HCO_3^- الضعيفَ التأيُّنِ، والأيونَ OH^-.

$$CO_3^{2-}(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows HCO_3^-(aq) + OH^-(aq)$$

يزدادُ تركيزُ الأيونِ OH^- حتى يتحقَّقَ الاتِّزانُ. وبالتالي ينخفضُ تركيزُ الأيونِ H_3O^+، بحيثُ يبقى حاصلُ $[OH^-]$ و $[H_3O^+]$ مساويًا لثابتِ تأيُّنِ الماءِ، K_w، عندَ درجةِ حرارةِ المحلولِ. هكذا تكونُ قيمةُ pH، أعلى من 7، ويكونُ المحلولُ قاعديًّا.

التحلل المائي للكاتيوناتِ

طبقًا لمفهومِ برونشتد، يمثِّلُ كاتيونُ الملحِ الحمضَ المرافقَ للقاعدةِ التي تكوَّنَ منها. هذا الكاتيونُ هو إذن مانحٌ للبروتونِ. فإذا كانَتِ القاعدةُ ضعيفةً، يكونُ الكاتيونُ حمضًا قويًّا بما يكفي لمنحِ بروتونٍ لجزيءِ الماءِ المستقبلِ للبروتونِ، ليكوِّنَ أيوناتِ H_3O^+. يتحقَّقُ اتِّزانٌ يكونُ فيهِ التأثيرُ النهائيُّ للتّحلل المائي للكاتيونِ زيادةً في تركيزِ أيونِ الهيدرونيومِ، $[H_3O^+]$ في المحلولِ.

التكاملُ في العلوم

المحاليلُ المنظّمةُ في الدم

يتمتَّعُ الدمُ طبيعيًّا بـ $pH = 7.4$، فإذا ارتفعَ pH الدمِ لإنسانٍ إلى أكثرَ من 7.8 أو انخفضَ إلى أقلَّ من 7.0، يكونُ تغيُّرُ pH هذا مميتًا. فالمنظِّمُ الأساسُ في الدمِ هو نظامُ حمضِ الكربونيكِ–أيونُ الكربوناتِ الهيدروجينيَّةِ.

$$CO_2(g) + H_2O(l) \rightleftarrows H_2CO_3(aq) + HCO_3^-(aq)$$

يسبِّبُ «التنفُّسُ البطيءُ» هبوطًا في قيمةِ pH. وهذا ينتجُ عن نقصٍ في التهويةِ، (الذي هو عكسُ الإفراطِ في التهويةِ)، أو التنفُّسِ البطيءِ. نقصُ التهويةِ ينتجُ عن قصورِ قلبٍ احتقانيٍّ، أو عن ذاتِ الرئةِ، أو عن المخدِّراتِ. وبما أن التنفُّسَ يتباطأُ، فإنَّ ثنائيَ أكسيدِ الكربونِ يتجمَّعُ، فيرتفعُ تركيزُه. ويسبِّبُ هذا التغيُّرُ انزياحًا في الاتِّزانِ إلى اليمينِ، تبعًا لمبدأ لو شاتيلييه، ويصبحُ الدمُ أكثرَ حمضيَّةً، لأن تركيزَ حمضِ الكربونيكِ أصبحَ أعلى.

تُستخدمُ معادلةُ الاتّزانِ التاليةُ لقاعدةٍ افتراضيَّةٍ ضعيفةٍ، B، من أجلِ اشتقاقِ التعبيرِ العامِّ لثابتِ تأيُّنِ القاعدةِ، K_b.

$$B(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows BH^+(aq) + OH^-(aq)$$

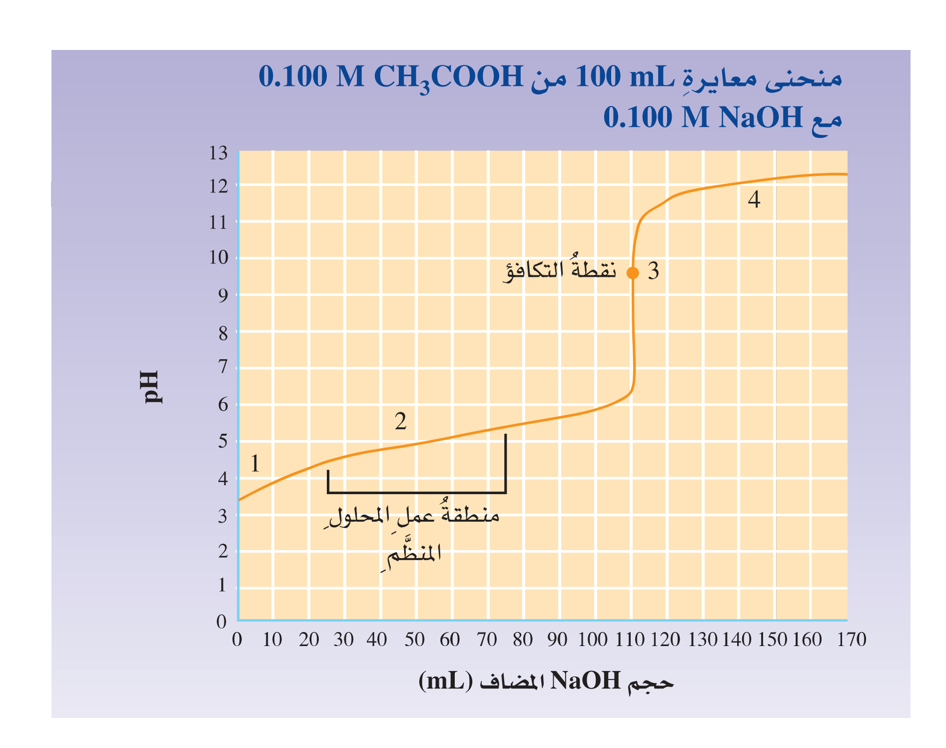
$$K_b = \frac{[BH^+][OH^-]}{[B]}$$

يتمثَّلُ تفاعلُ التحلل بينَ الماءِ والكاتيون، BH^+، المكوَّنِ من تأيُّنِ القاعدةِ الضعيفةِ، B، بمعادلةِ الاتّزانِ العامَّةِ التاليةِ:

$$BH^+(aq) + H_2O(l) \rightleftarrows H_3O^+(aq) + B(aq)$$

في التفاعلِ الأماميِّ، يمنحُ الكاتيون BH^+ بروتونًا لجزيءِ الماءِ، ليكوِّنَ أيونَ الهيدرونيوم وقاعدةً ضعيفةً. يعتمد مدى تكوُّنِ الأيونِ H_3O^+ ووضعُ الاتّزانِ على القوةِ النسبيَّةِ للكاتيون BH^+. فبقدرِ ما تكونُ قيمةُ K_b للقاعدةِ B منخفضةً، تكونُ قدرةُ BH^+ على منحِ بروتونٍ، أعلى، مقارنةً مع H_3O^+. ويكونُ إنتاجُ الأيوناتِ H_3O^+ أكبرَ. لذلك، يكونُ الحمضُ المرافقُ أقوى كلما كانَتِ القاعدةُ أضعفَ.

يتفكَّكُ كلوريدُ الأمونيوم، NH_4Cl، في الماءِ لينتجَ أيوناتِ NH_4^+ و Cl^- ومحلولاً حمضيًّا. أيونُ الكلوريدِ هو القاعدةُ المرافقةُ للحمضِ القويِّ، HCl. فهو لا يبدي إذن أيَّ ميلٍ إلى التحلل في المحلولِ المائيِّ. بينما تمثِّلُ أيوناتُ الأمونيوم، الحمضَ المرافقَ للقاعدةِ الضعيفةِ، NH_3. فتمنحُ أيوناتُ الأمونيوم بروتوناتٍ لجزيئاتِ الماءِ. ويتحقَّقُ اتّزانٌ بزيادةِ $[H_3O^+]$. هكذا يكونُ pH أقلَّ من 7.



الشكل 7-11 عندَ النقطةِ 1 على منحنى المعايرةِ، يوجدُ حمضُ الأسيتيكِ فقط. فتعتمدُ قيمةُ pH على الحمضِ الضعيفِ وحدَه. عند النقطةِ 2 يوجدُ خليطٌ من CH_3COOH وCH_3COO^-. بإضافةِ NaOH، يتغيَّرُ pH ببطءٍ. عندَ النقطةِ 3 يكونُ كلُّ الحمضِ قد تحوَّلَ إلى CH_3COO^-. هذا الأيونُ يتميَّأُ لينتجَ محلولاً قاعديًّا ضعيفًا. عندَ النقطةِ 4 يتحدَّدُ pH بفائضِ أيوناتِ OH^- المضافةِ.

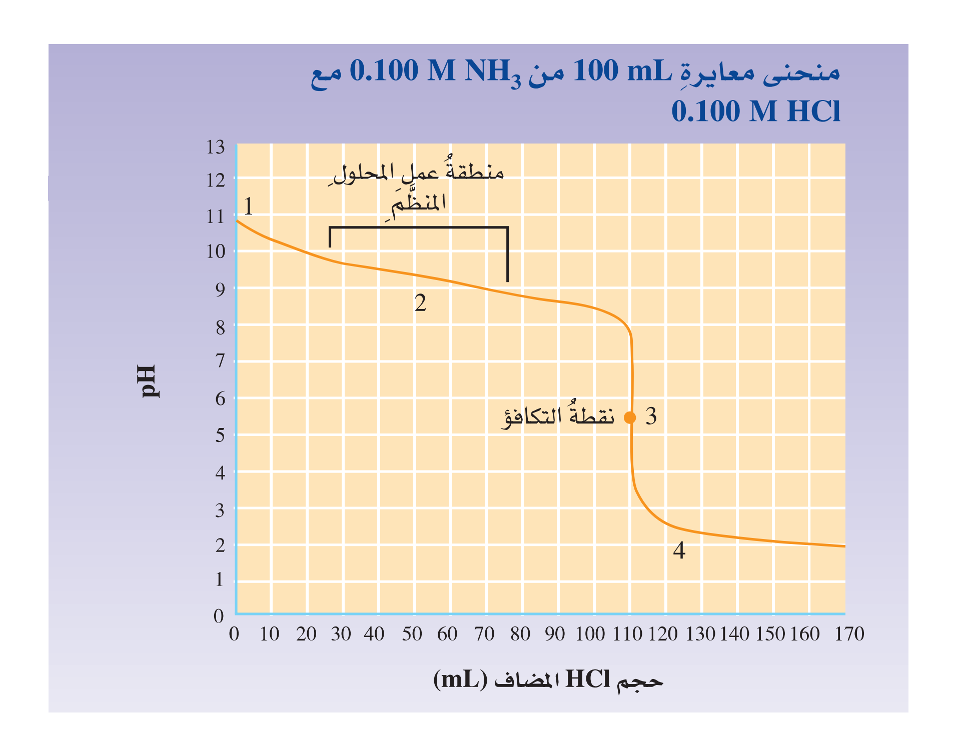
التحلل المائي في تفاعلاتِ الحمضِ-القاعدة

من خلالِ دراستِك للتحلل المائي يمكنُ أن تفسِّرَ لماذا يمكنُ أن تحدُثَ نقطةُ النهايةِ لتفاعلِ التعادلِ، عندَ pH مختلفٍ عن 7. تحدِّدُ خصائصُ التحلل المائي للأملاحِ بواسطةِ القوى النسبيَّةِ للأحماضِ والقواعدِ التي تكوِّنُ هذهِ الأملاحَ، والتي تُقسَّمُ إلى أربعِ فئاتٍ عامَّةٍ، بحسبِ خصائصِ التحلل المائي لكل فئةٍ: حمضٍ قوي-قاعدةٍ قوية، حمضٍ قويٍّ-قاعدةٍ ضعيفةٍ، حمضٍ ضعيفٍ-قاعدةٍ قويَّةٍ، حمضٍ ضعيفٍ-قاعدةٍ ضعيفةٍ.

الأملاحُ المكوَّنةُ من الأحماضِ القويَّةِ والقواعدِ القويَّةِ، تنتجُ محاليلَ متعادلةً، لأن كاتيونَ القاعدةِ القويَّةِ وأنيونَ الحمضِ القويِّ لا يخضعانِ كلاهما لتحلل ملحوظٍ في المحاليلِ المائيَّةِ. $HCl(aq)$ حمضٌ قويٌّ، و $NaOH(aq)$ قاعدةٌ قويةٌ، فلا كاتيونُ القاعدةِ القويَّةِ Na^+، ولا أنيونُ الحمضِ القويِّ Cl^-، يخضعان لتفاعلِ التحلل في المحاليلِ المائيَّةِ. لذلك تكونُ المحاليلُ المائيَّةُ لـ NaCl متعادلةً. وينسحبُ ذلك على KNO_3، وهو ملحٌ مكوَّنٌ من الحمضِ القويِّ HNO_3 والقاعدةِ القويَّةِ KOH. تبيِّنُ القياساتُ أن المحاليلَ المائيَّةَ لـ KNO_3 لها قيمُ pH قريبةٌ من 7.

المحاليلُ المائيَّةُ للأملاحِ المكوَّنةِ من تفاعلاتِ الأحماضِ الضعيفةِ والقواعدِ القويَّةِ، هي محاليلُ قاعديَّةٌ. يبيِّنُ الشكلُ 7-11 أن أنيوناتِ الملحِ الذائب تتحلل في الماءِ وترتفعُ قيمةُ pH للمحلولِ مما يشيرُ إلى ازديادِ تركيزِ أيونِ الهيدروكسيد. فالمحاليلُ المائيَّةُ لأسيتاتِ الصوديوم، CH_3COONa، قاعديَّةٌ. والواقعُ أن أيوناتِ الأسيتاتِ CH_3COO^- تخضعُ لتفاعلِ التحلل المائي، لأن هذه الأيوناتِ أنيوناتُ حمضٍ ضعيفٍ هو حمضُ الأسيتيكِ. أما كاتيوناتُ الملحِ فهي أيوناتٌ موجبةٌ من قاعدةٍ قويَّةٍ NaOH، وهي بالتالي لا تتحلل، لأن NaOH تتفكَّكُ بنسبةِ 100%.

يبيِّنُ الشكلُ 7-12 أن أملاحَ الأحماضِ القويَّةِ والقواعدِ الضعيفةِ تنتجُ محاليلَ مائيَّةً حمضيَّةً. فكاتيوناتُ الملحِ الذائبِ تتميَّأُ في الماءِ (المذيبِ)، وبذلك تنخفضُ قيمةُ pH



الشكل 7-12 عندَ النقطةِ 1 على منحنى المعايرةِ، يوجدُ فقط محلولُ الأمونيا. هنا يتحدَّدُ pH بالقاعدةِ وحدَها. عندَ النقطةِ 2 يوجدُ خليطٌ من NH_3 و NH_4^+. بإضافةِ HCl يتغيَّرُ pH ببطءٍ. عندَ النقطةِ 3 يكونُ محلولُ الأمونيا قد تحوَّلَ كلُّه إلى NH_4^+. عندَ النقطةِ 4 يتحدَّدُ pH بفائضِ أيوناتِ H_3O^+ المضافةِ.

المحلول مشيرةً إلى ازدياد تركيز أيون الهيدرونيوم. في هذه الحالة، تخضعُ كاتيوناتُ الملح الذائب لتفاعل التحلل المائي، لأنها تمثّلُ الأيونات الموجبةَ للقاعدةِ الضعيفةِ. أما أنيوناتُ الملح، فهي الأيوناتُ السالبةُ للحمضِ القويِّ؛ وهي لا تخضعُ لتحلل مائي ملحوظٍ. NH_4Cl ملحٌ ينتجُ محلولاً حمضيًّا.

الأملاحُ المكوَّنةُ من الأحماضِ الضعيفةِ والقواعدِ الضعيفةِ، يمكنُها أن تنتجَ إما محاليلَ مائيَّةً حمضيَّةً، وإمَّا محاليلَ متعادلةً أو قاعديَّةً، بحسبِ طبيعةِ الملحِ الذائبِ؛ ذلك أن النوعَيْن من أيوناتِ الملحِ الذائبِ يخضعانِ للتحلل المائي بشكلٍ كبيرٍ. فإذا كانَ التحلل المائي متساويًا لنوعَيِ الأيوناتِ، يبقى المحلولُ إذ ذاك متعادلاً. الأيونان في أسيتاتِ الأمونيوم CH_3COONH_4 يتحللان بشكلٍ متساوٍ. لذلك يُنتجان محلولاً متعادلاً، كما يبيِّنُ الشكلُ 7-10 (د).

أما الحالاتُ التي يكونُ فيها الحمضُ والقاعدةُ ضعيفَيْن ومختلفَيْن في قيم K_a و K_b فيعتمدُ pH المحلول على القيمةِ الأكبر لـ K_a أو K_b.

مراجعةُ القسم 7-3

1. وضّح المقصودَ بكلٍّ من: ثابتِ تأيُّنِ الحمض، المحلولِ المنظَّم، الحاصل الأيونيِّ للماءِ، التحلل المائي.

2. أيُّ مزيجٍ من المحاليلِ التاليةِ يُعدُّ محلولاً منظّمًا؟
   أ. 50 mL من 1.0 M NaCl و 50 mL من 1.0 M HCl
   ب. 50 mL من $1.0\ M\ NaNO_2$ و 25 mL من $0.5\ M\ HNO_2$
   ج. 25 mL من 1.0 M NaCl و 25 mL من $1.0\ M\ HNO_2$

3. حدِّدْ هويةَ زوجِ الحمضِ–القاعدةِ المرافقَيْن لكلٍّ من التفاعلاتِ التاليةِ:
   أ. $H_2CO_3 + H_2O \rightleftarrows HCO_3^- + H_3O^+$
   ب. $H_2O + H_2O \rightleftarrows H_3O^+ + OH^-$
   ج. $H_2S + NH_3 \rightleftarrows HS^- + NH_4^+$
   د. $H_2PO_4^- + H_2O \rightleftarrows H_3PO_4 + OH^-$

4. قارنْ بينَ التحلل المائي للكاتيونِ والتحلل المائي للأنيون.

5. أيٌّ من الأيوناتِ التاليةِ يخضعُ للتحلل في المحلولِ المائيِّ؟
   أ. NO_3^- د. K^+ ز. CO_3^{2-}
   ب. F^- هـ. CH_3COO^- ح. PO_4^{3-}
   ج. NH_4^+ و. SO_4^{2-}

6. حدِّدْ هويَّةَ المحاليلِ التاليةِ، كمحاليلَ حمضيَّةٍ أو قاعديَّةٍ أو متعادلةٍ.
   أ. 0.5 M KI ج. $0.25\ M\ NH_4NO_3$
   ب. $0.10\ M\ Ba(OH)_2$ د. $0.05\ M\ BaCO_3$

7. حدِّدْ هويةَ الحمضِ والقاعدةِ اللذَيْن تتكوَّنُ منهما الأملاحُ التاليةُ:
   أ. K_2CrO_4 ج. CaF_2
   ب. $(CH_3COO)_2Ca$ د. $(NH_4)_2SO_4$

تفكيرٌ ناقد

8. **ربطُ أفكار:** صِفْ كيفَ يتمُّ تحضيرُ محلولٍ منظَّمٍ باستخدامِ قاعدةٍ قويَّةٍ ومتفاعلٍ واحدٍ آخرَ.

القسم 7-4

اتّزانُ الإذابةِ

مؤشّراتُ الأداءِ

- يُوضحُ المقصودَ بثابتِ حاصلِ الإذابةِ ويحسبُ قيمتَه.
- يحسبُ الذوبانيَّةَ باستخدامِ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ.
- يُجري حساباتٍ لتوقُّعِ تكوُّنِ راسبٍ عندما تُمزَجُ المحاليلُ.

تذوبُ الموادُّ الصلبةُ الأيونيَّةُ في الماءِ، إلى أن تبلغَ حالةَ اتّزانٍ مع أيوناتِها. يمكنُ كتابةُ تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ، انطلاقًا من المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ لتفكُّكِ المادَّةِ الصلبةِ. أما تراكيزُ الأيوناتِ، فيمكنُ تحديدُها من خلالِ المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ، ومن قيمِ الذوبانيَّةِ. عندَها يمكنُ استخدامُ تراكيزِ الأيوناتِ، لتحديدِ قيمةِ ثابتِ الاتّزانِ. والقيمةُ الرقميَّةُ لثابتِ الاتّزانِ، يمكنُ استخدامُها لتوقُّعِ تكوُّنِ راسبٍ، عندما يتمُّ مزجُ المحاليلِ بتراكيزَ متعدِّدةٍ.

حاصلُ الإذابةِ

يحتوي المحلولُ المشبعُ على أقصى كمّيَّةٍ ممكنةٍ من المذابِ موجودةٍ في حالةِ اتّزانٍ مع فائضِ المادَّةِ غيرِ الذائبةِ، وذلك عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ. يلزمُ التذكيرُ بأن المحلولَ المشبعَ ليسَ بالضرورةِ محلولاً مركَّزًا. قد يكونُ التركيزُ مرتفعًا أو منخفضًا تبعًا لذوبانيَّةِ المذابِ.

غالبًا ما يتمُّ استخدامُ قاعدةٍ عامَّةٍ للتعبيرِ نوعيًا عن الذوبانيَّةِ. بناءً على هذهِ القاعدةِ، يقالُ عن مادَّةٍ إنها قابلةٌ للذوبانِ، إذا كانَتْ ذوبانيَّتُها أكبرَ من 1 g في 100 g من الماءِ. ويقالُ بأنها غيرُ قابلةٍ للذوبانِ إذا كانَتْ ذوبانيتُها أقلَّ من 0.1 g في 100 g من الماءِ. أما الموادُّ التي تقعُ ذوبانيتُها بين هذَيْنِ الحدَّيْنِ، فتوصفُ بأنها شحيحةُ الذوبانِ.

تطبَّقُ مبادئُ الاتّزانِ الواردةُ في هذا الفصلِ على كلِّ المحاليلِ المشبعةِ بالأملاحِ الشحيحةِ الذوبانِ. فكلوريدُ الفضَّةِ شحيحُ الذوبانِ في الماءِ حتى أنهُ يوصفُ أحيانًا بأنَّهُ غيرُ قابلٍ للذوبانِ. كما أن محلولَهُ يبلغُ الإشباعَ بتركيزٍ متدنٍّ جدًّا لأيوناتِه. وكلُّ أيوناتِ Ag^+ و Cl^- الفائضةِ عن هذا التركيزِ تترسَّبُ بشكلِ AgCl.

لنتأمَّلْ نظامَ الاتّزانِ لمحلولٍ مشبعٍ من كلوريدِ الفضَّةِ يحتوي على فائضٍ من الملحِ الصلبِ. يتمثَّلُ هذا النظامُ بالمعادلةِ الكيميائيَّةِ وبتعبيرِ الاتّزانِ التاليَيْنِ:

$$AgCl(s) \rightleftarrows Ag^+(aq) + Cl^-(aq)$$

تمثِّلُ هذه المعادلةُ اتّزانًا غيرَ متجانسٍ. وسوف نتَّبعُ الاصطلاحَ المعتمدَ في كتابةِ تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ، دونَ تضمينِ الأنواعِ الصلبةِ في هذا التعبيرِ. لذلك لن يظهرَ [AgCl] في التعبيرِ النهائيِّ. يعطي تعبيرُ ثابتِ الاتّزانِ الناتجِ ثابتَ حاصلِ الإذابةِ K_{sp}. **ثابتُ حاصلِ الإذابةِ solubility product constant** ***لمادَّةٍ معيَّنةٍ هو حاصلُ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ لأيوناتِها في محلولٍ مشبعٍ، كلٌّ مرفوعٌ إلى أسٍّ يمثِّلُ معاملَ هذا الأيونِ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ.***

$$K_{sp} = [Ag^+][Cl^-]$$

هذه المعادلةُ تبيِّنُ تعبيرَ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ لكلوريدِ الفضَّةِ. وهي تبيِّنُ أن ثابتَ حاصلِ الإذابةِ، K_{sp}، لـ AgCl هو حاصلُ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ لأيوناتِها في المحلولِ المشبعِ.

فلوريدُ الكالسيومِ مثالٌ على ملحٍ شحيحِ الذوبانِ. واتِّزانُ محلولِ CaF_2 المشبعِ يوصفُ بالمعادلةِ التاليةِ:

$$CaF_2(s) \rightleftarrows Ca^{2+}(aq) + 2F^-(aq)$$

يكتبُ ثابتُ حاصلِ الإذابةِ لهذا الملحِ، على الشكلِ التالي:

$$K_{sp} = [Ca^{2+}][F^-]^2$$

ومن الجديرِ بالملاحظةِ أن هذا الثابتَ هو حاصلُ ضربِ التركيزِ المولاريِّ للأيوناتِ Ca^{2+}، في مربَّعِ التركيزِ المولاريِّ لأيوناتِ F^-.

يمكنُ تحديدُ القيمةِ الرقميَّةِ لـ K_{sp}، من قيمِ الذوبانيَّةِ، التي تشيرُ إلى أن 1.9×10^{-4} g هي الكمّيَّةُ القصوى من AgCl التي يمكنُ أن تذوبَ في 100. g من الماءِ عندَ درجةِ الحرارةِ 25°C. ولتحويلِها إلى التركيزِ بالمول/لتر (تركيزِ الإشباعِ) نقومُ بعمليَّةِ الحسابِ التالي:

$$\frac{1.9 \times 10^{-4}\ \text{g AgCl}}{100.\ \text{g } H_2O} \times \frac{1\ \text{g } H_2O}{1\ \text{mL } H_2O} \times \frac{1000\ \text{mL}}{1\ \text{L}} \times \frac{1\ \text{mol AgCl}}{143.32\ \text{g AgCl}}$$
$$= 1.3 \times 10^{-5}\ \text{mol/L}$$

يتفكَّكُ كلوريدُ الفضَّةِ في المحلولِ، بحيثُ ينتجُ عددٌ متساوٍ من أيوناتِ Ag^+ و Cl^-. لذلك تكونُ تراكيزُ الأيوناتِ مساويةً لـ 1.3×10^{-5} mol/L.

$$[Ag^+] = 1.3 \times 10^{-5}\ \text{mol/L}$$
$$[Cl^-] = 1.3 \times 10^{-5}\ \text{mol/L}$$

و

$$K_{sp} = [Ag^+][Cl^-]$$
$$K_{sp} = (1.3 \times 10^{-5})(1.3 \times 10^{-5})$$
$$K_{sp} = (1.3 \times 10^{-5})^2$$
$$K_{sp} = 1.7 \times 10^{-10}$$

هذه النتيجةُ هي قيمةُ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ لـ AgCl، عندَ درجةِ حرارةِ 25°C.

كذلك تساوي ذوبانيَّةُ CaF_2 8.6×10^{-3}/100 g H_2O عندَ درجةِ حرارةِ 25°C. هذا التركيزُ، إذا عُبِّرَ عنه بمولاتٍ في لترٍ، يصبحُ 1.1×10^{-3} mol/L. يتفكَّكُ CaF_2 في المحلولِ ليُنتجَ أيوناتِ F^- ضعفَ ما ينتجُه من أيوناتِ Ca^{2+}. فتكونُ تراكيزُ الأيوناتِ في المحلولِ المشبعِ 1.1×10^{-3} لأيوناتِ الكالسيومِ، و $2(1.1 \times 10^{-3})$، أو 2.2×10^{-3} لأيوناتِ الفلوريدِ. لاحظْ أن $[Ca^{2+}]$ في حالةِ الاتِّزانِ وعندَ درجةِ حرارةِ 25°C تساوي الذوبانيَّةَ. وهذه تساوي 1.1×10^{-3} mol/L بينما $[F^-]$ تساوي ضعفَ الذوبانيَّةِ، أي 2.2×10^{-3} mol/L.

لذلك يلزمُ دائمًا عندَ استخدامِ K_{sp} والذوبانيَّةِ مراعاةُ عددِ الأيوناتِ الموجبةِ والأيوناتِ السالبةِ الموجودةِ في مولٍ واحدٍ من المركَّبِ.

$$K_{sp} = [Ca^{2+}][F^-]^2$$
$$K_{sp} = (1.1 \times 10^{-3})(2.2 \times 10^{-3})^2$$
$$K_{sp} = 5.3 \times 10^{-9}$$

وهكذا فإنَّ ثابتَ حاصلِ الإذابةِ لـ CaF_2 يكونُ 5.3×10^{-9} عندَ درجةِ حرارةِ 25°C. من الصعبِ قياسُ التراكيزِ الصغيرةِ جدًّا للمذابِ بدقَّةٍ. لهذا السببِ قد تُقدِّمُ قيمُ الذوبانيَّةِ من مصادرَ مختلفةٍ، قِيَمًا مختلفةً لـ K_{sp} لمادَّةٍ معيَّنةٍ. لهذا يجدرُ عادةً أن تُحدَّدَ حساباتُ الـ K_{sp} برقمَيْن معنويَّيْن يُظهرُ الجدولُ 7-3 قيمَ K_{sp} عند 25°C، لبعضِ المركَّباتِ شحيحةِ الذوبانِ. إن كلَّ البياناتِ المستخدمةِ لحساباتِ الـ K_{sp} أُخذَتْ عندَ درجةِ حرارةِ 25°C، إلا إذا أشيرَ إلى غيرِ ذلك.

عليك الآنَ أن تلاحظَ الفرقَ بين ذوبانيَّةِ مادَّةٍ صلبةٍ وثابتِ حاصلِ الإذابةِ لهذه المادَّةِ. تذكَّرْ أنَّ ثابتَ حاصلِ الإذابةِ هو ثابتُ اتِّزانٍ يمثِّلُ حاصلَ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ لأيوناتِه في المحلولِ المشبعِ. هذا الثابتُ له قيمةٌ واحدةٌ فقط لمادَّةٍ صلبةٍ معيَّنةٍ، عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ. وذوبانيَّةُ المادَّةِ الصلبةِ هي حالةُ الاتِّزانِ التي تمثِّلُ الكمّيَّةَ اللازمةَ من هذه المادَّةِ، لتكوينِ محلولٍ مشبعٍ في كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من المذيبِ، عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ.

الجدول 7-3 ثوابتُ حاصلِ الإذابةِ، K_{sp} عند 25°C

الملح	الحاصلُ الأيونيُّ	K_{sp}	الملح	الحاصلُ الأيونيُّ	K_{sp}
CH_3COOAg	$[Ag^+][CH_3COO^-]$	1.9×10^{-3}	$CuCl$	$[Cu^+][Cl^-]$	1.2×10^{-6}
$AgBr$	$[Ag^+][Br^-]$	5.0×10^{-13}	CuS	$[Cu^{2+}][S^{2-}]$	6.3×10^{-36}
Ag_2CO_3	$[Ag^+]^2[CO_3^{2-}]$	8.1×10^{-12}	FeS	$[Fe^{2+}][S^{2-}]$	6.3×10^{-18}
$AgCl$	$[Ag^+][Cl^-]$	1.8×10^{-10}	$Fe(OH)_2$	$[Fe^{2+}][OH^-]^2$	8.0×10^{-16}
AgI	$[Ag^+][I^-]$	8.3×10^{-17}	$Fe(OH)_3$	$[Fe^{3+}][OH^-]^3$	4×10^{-38}
Ag_2S	$[Ag^+]^2[S^{2-}]$	6.3×10^{-50}	HgS	$[Hg^{2+}][S^{2-}]$	1.6×10^{-52}
$Al(OH)_3$	$[Al^{3+}][OH^-]^3$	1.3×10^{-33}	$MgCO_3$	$[Mg^{2+}][CO_3^{2-}]$	3.5×10^{-8}
$BaCO_3$	$[Ba^{2+}][CO_3^{2-}]$	5.1×10^{-9}	$Mg(OH)_2$	$[Mg^{2+}][OH^-]^2$	1.8×10^{-11}
$BaSO_4$	$[Ba^{2+}][SO_4^{2-}]$	1.1×10^{-10}	MnS	$[Mn^{2+}][S^{2-}]$	2.5×10^{-13}
CdS	$[Cd^{2+}][S^{2-}]$	8.0×10^{-27}	$PbCl_2$	$[Pb^{2+}][Cl^-]^2$	1.6×10^{-5}
$CaCO_3$	$[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$	2.8×10^{-9}	$PbCrO_4$	$[Pb^{2+}][CrO_4^{2-}]$	2.8×10^{-13}
CaF_2	$[Ca^{2+}][F^-]^2$	5.3×10^{-9}	$PbSO_4$	$[Pb^{2+}][SO_4^{2-}]$	1.6×10^{-8}
$Ca(OH)_2$	$[Ca^{2+}][OH^-]^2$	5.5×10^{-6}	PbS	$[Pb^{2+}][S^{2-}]$	8.0×10^{-28}
$CaSO_4$	$[Ca^{2+}][SO_4^{2-}]$	9.1×10^{-6}	SnS	$[Sn^{2+}][S^{2-}]$	1.0×10^{-25}
$CoCO_3$	$[Co^{2+}][CO_3^{2-}]$	1.4×10^{-13}	$SrSO_4$	$[Sr^{2+}][SO_4^{2-}]$	3.2×10^{-7}
CoS	$[Co^{2+}][S^{2-}]$	4.0×10^{-21}	ZnS	$[Zn^{2+}][S^{2-}]$	1.6×10^{-24}

مسألةٌ نموذجية 2-7

احسبْ ثابتَ حاصل الإذابةِ K_{sp}، لكلوريدِ النحاسِ (I)، CuCl، علمًا بأن ذوبانيَّةَ هذا المركَّبِ عند درجةِ حرارة 25°C، هي 1.08×10^{-2} g/100. g H_2O.

1 حلِّل

المعطى: ذوبانيَّةُ CuCl = 1.08×10^{-2} g CuCl/100. g H_2O

المجهول: K_{sp}

2 خطِّطْ

ابدأ بتحويلِ ذوبانيَّةِ CuCl من g/100.g H_2O إلى mol/L. ستحتاجُ إلى الكتلةِ الموليَّةِ لـ CuCl لتحويلِ كمّيَّةِ CuCl من الجرامِ إلى المول، ثم استخدمْ ذوبانيَّةَ أيوناتِ $[Cu^+]$ و $[Cl^-]$ في تعبيرِ K_{sp}، وحُلَّ لتجدَ K_{sp}.

$$\text{mol/L الذوبانيَّة} = \frac{1\text{ g }H_2O}{100.\text{ g }H_2O} \times \frac{1\text{ g }H_2O}{1\text{ mL }H_2O} \times \frac{1000\text{ mL}}{1\text{ L}} \times \frac{1\text{ mol CuCl}}{\text{g CuCl}}$$

$$CuCl(s) \rightleftarrows Cu^+(aq) + Cl^-(aq)$$

$$K_{sp} = [Cu^+][Cl^-]$$

$$[Cu^+] = [Cl^-] = \text{mol/L الذوبانية}$$

3 احسبْ

الكتلةُ الموليَّةُ لـ CuCl تساوي 99.0 g/mol.

$$\text{الذوبانيَّةُ} = \frac{1.08 \times 10^{-2}\text{ g CuCl}}{100.\text{ g }H_2O} \times \frac{1\text{ g }H_2O}{1\text{ mL }H_2O} \times \frac{1000\text{ mL}}{1\text{ L}} \times \frac{1\text{ mol CuCl}}{99.0\text{ g CuCl}}$$

$$= 1.09 \times 10^{-3}\text{ mol/L CuCl}$$

$$[Cu^+] = [Cl^-] = 1.09 \times 10^{-3}\text{ mol/L}$$

$$K_{sp} = (1.09 \times 10^{-3})(1.09 \times 10^{-3}) = 1.19 \times 10^{-6}$$

4 قَيِّمْ

يحتوي الجوابُ على العددِ الصحيحِ من الأرقامِ المعنويَّةِ، وهو قريبٌ جدًّا من قيمةِ K_{sp} المعطاةِ في الجدولِ 3-7.

تمارينُ تطبيقيَّة

1. احسبْ ثابتَ حاصلِ الإذابةِ، K_{sp}، لكلوريدِ الرصاصِ (II)، $PbCl_2$ الذي له ذوبانيَّةٌ 1.0 g/100. g H_2O عندَ درجةِ حرارةِ 20°C.

2. عيّنةٌ من Ag_2SO_4 كتلتُها 5.0 g تذوبُ في 1.0 L من الماءِ لتكوينِ محلولٍ مشبعٍ. احسُبْ ثابتَ حاصلِ الإذابةِ لهذا الملحِ.

الجواب

1. 1.9×10^{-4}

إذا لاحظَ المتعلِّمون أن هذه القيمةَ تختلفُ عن القيمةِ المبيَّنةِ في الجدولِ 3-7 أشرْ إلى أن درجةَ الحرارةِ المُعطاةَ مختلفةٌ (20°C عوضًا عن 25°C)، وأن ذوبانيَّةَ $PbCl_2$ تزدادُ مع ارتفاعِ درجةِ الحرارة.

2. 1.6×10^{-5}

حسابُ الذوبانيَّةِ

بمجرَّدِ أن تعرفَ قيمةَ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ، يمكنُكَ استخدامُها لتحديدِ ذوبانيَّةِ ملحٍ شحيحِ الذوبانِ. لنفترضْ أنك ترغبُ في معرفةِ عددِ مولاتِ كربوناتِ الباريومِ، $BaCO_3$،

التي يمكنُ أن تذوبَ في 1 L من الماءِ عندَ 25°C. يمكنُ من الجدول 7-3 معرفةُ قيمةِ K_{sp} الرقميَّةِ لـ $BaCO_3$، 5.1×10^{-9}. ويمكنُ كتابةُ معادلةِ الاتّزانِ كالتالي:

$$BaCO_3(s) \rightleftarrows Ba^{2+}(aq) + CO_3^{2-}(aq)$$

وبما أن قيمةَ K_{sp} معطاةٌ، فيمكنُنا كتابةُ تعبيرِ حاصلِ الإذابةِ كالتالي:

$$K_{sp} = [Ba^{2+}][CO_3^{2-}] = 5.1 \times 10^{-9}$$

لذلك تذوبُ $BaCO_3$ إلى أن يصبحَ حاصلُ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ للأيوناتِ Ba^{2+} و CO_3^{2-} مساويًا لقيمةِ 5.1×10^{-9}. تبيِّنُ المعادلةُ الموزونةُ أن أيوناتِ Ba^{2+} وأيوناتِ CO_3^{2-} تدخلُ إلى المحلولِ بأعدادٍ متساويةٍ، عندَما يذوبُ الملحُ. لذلك يكونُ لها التركيزُ نفسُه. لنفترضْ أن $[Ba^{2+}] = x$ فإن $[CO_3^{2-}] = x$ أيضًا.

$$[Ba^{2+}][CO_3^{2-}] = K_{sp} = 5.1 \times 10^{-9}$$
$$(x)(x) = x^2 = 5.1 \times 10^{-9}$$
$$x = \sqrt{5.1 \times 10^{-9}}$$

الذوبانيَّةُ بالمول/لتر لـ $BaCO_3$ تساوي 7.1×10^{-5} mol/L.

بذلك يكونُ تركيزُ المحلولِ 7.1×10^{-5} M للأيونات Ba^{2+} و 7.1×10^{-5} M للأيونات CO_3^{2-}.

مسألةٌ نموذجية 7-3

احسبْ ذوبانيَّةَ بروميدِ الفضَّةِ AgBr، بـ mol/L، مستخدمًا قيمةَ K_{sp} لهذا المركَّبِ المبيَّنَةَ في الجدولِ 7-3.

1 الحلّ حلِّل

المعطى: $K_{sp} = 5.0 \times 10^{-13}$

المجهول: ذوبانيَّة AgBr

2 خطِّطْ

$$AgBr \rightleftarrows Ag^{+}(aq) + Br^{-}(aq)$$
$$K_{sp} = [Ag^{+}][Br^{-}]$$

$[Ag^{+}] = [Br^{-}]$، لنفترضْ إذًا $[Br^{-}] = x$ و $[Ag^{+}] = x$

3 احسِبْ

$$K_{sp} = [Ag^{+}][Br^{-}]$$
$$K_{sp} = x^2$$
$$x^2 = 5.0 \times 10^{-13}$$
$$x = \sqrt{5.0 \times 10^{-13}}$$

ذوبانيَّةُ AgBr $= \sqrt{5.1 \times 10^{-13}} = 7.1 \times 10^{-7}$ mol/L

4 قَيِّمْ

يحتوي الجوابُ على العددِ الصحيحِ للأرقامِ المعنويَّةِ، وهو قريبٌ جدًّا من القيمةِ المقدَّرةِ 7.1×10^{-7} المحسوبة من $\sqrt{49 \times 10^{-14}}$.

تمارينُ تطبيقية

1. احسبْ ذوبانيَّةَ كبريتيدِ الكادميوم، CdS، بـ mol/L مستخدمًا قيمةَ K_{sp} المبيَّنةِ في الجدول 7-3.
2. احسبْ تركيزَ أيوناتِ السترونشيوم في محلولٍ مشبعٍ بكبريتاتِ السترونشيوم، $SrSO_4$، إذا علمْتَ أن قيمةَ K_{sp} لـ $SrSO_4$ تساوي 3.2×10^{-7}.

الجواب

1. 8.9×10^{-14} mol/L
2. 5.7×10^{-4} mol/L

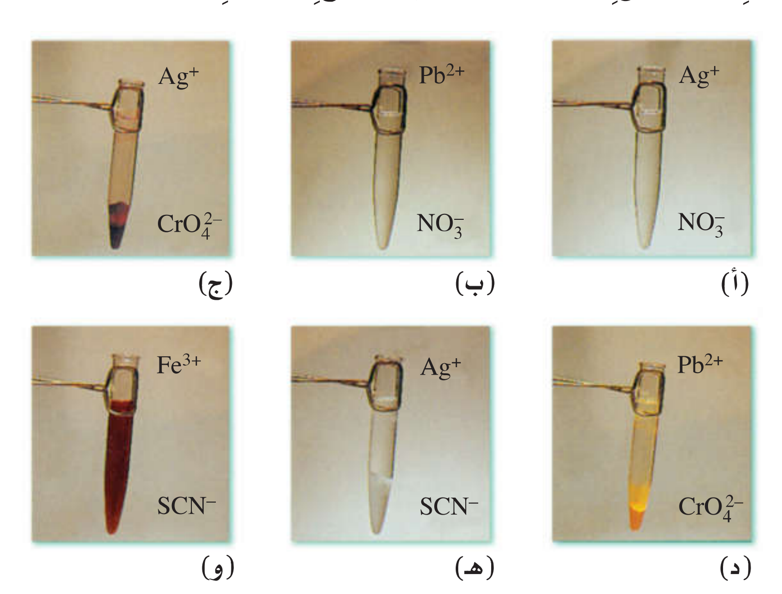
حساباتُ الترسُّبِ

في مثالٍ سابقٍ استخدمْتَ $BaCO_3$ كمصدرٍ للأيوناتِ Ba^{2+} و CO_3^{2-}. وبما أن كلَّ مولٍ من $BaCO_3$ ينتجُ مولاً واحدًا من أيوناتِ Ba^{2+} ومولاً واحدًا من أيوناتِ CO_3^{2-}، يكونُ تركيزا الأيونَيْنِ متساوييْن. مع ذلك فإن ظروفَ الاتّزان لا تتطلَّبُ أن يكونَ تركيزا الأيونَيْنِ متساوييْن. والاتزانُ سيبقى موجودًا ما دامَ حاصلُ الأيوناتِ $[Ba^{2+}][CO_3^{2-}]$ لا يتخطّى قيمةَ K_{sp} للنظامِ.

بشكلٍ مماثلٍ، إذا كانَ حاصلُ ضربِ تركيزِ الأيوناتِ (الحاصلُ الأيونيُّ) $[Ca^{2+}][F^-]^2$ أقلَّ من قيمةِ K_{sp} عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، يكونُ المحلولُ غيرَ مشبعٍ. وإذا كانَ الحاصلُ الأيونيُّ أكبرَ من قيمةِ K_{sp}، فإن CaF_2 يترسَّبُ. يقلِّلُ هذا الترسُّبُ من تراكيزِ الأيوناتِ Ca^{2+} و F^-، إلى أن يتحقَّقَ الاتّزانُ.

لنفترضْ أن كمّيَّتَيْنِ غيرَ متساويتَيْنِ من $BaCl_2$ و Na_2CO_3 أُذيبتا في الماءِ، وأن المحلوليْن مُزجا. فإذا جاوزَ الحاصلُ الأيونيُّ $[Ba^{2+}][CO_3^{2-}]$ قيمةَ K_{sp} لـ $BaCO_3$، يتكوَّنُ راسبٌ منَ $BaCO_3$. ويستمرُّ الترسُّبُ حتى تنخفضَ تراكيزُ الأيوناتِ إلى الدرجةِ التي يتساوى عندَها $[Ba^{2+}][CO_3^{2-}]$ مع K_{sp}.

تختلفُ الموادُّ كثيرًا في ميولِها إلى تكوينِ رواسبَ، عندما تُمزَجُ محاليلُها بتراكيزَ معتدلةٍ. الصورُ الظاهرةُ في الشكل 7-13 تبيِّنُ سلوكَ بعضِ الأنيوناتِ تجاهَ الكاتيوناتِ. لاحظْ أن بعضَ التفاعلاتِ كوَّنَتْ رواسبَ، وبعضُها لم يكوِّنْ. لذلك يمكنُ استخدامُ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ لتوقُّعِ إمكانيَّةِ تكوُّنِ راسبٍ عندَ مزجِ محلولَيْنِ معيَّنَيْنِ.



الشكل 7-13 أملاحُ نيترات Ag^+ (أ)، و Pb^{2+} (ب) قابلةٌ للذوبان. وعندما تتحدُ أيوناتُ الكروماتِ، CrO_4^{2-} مع Ag^+ (ج)، أو مع Pb^{2+} (د)، يتكوَّنُ ملحٌ غيرُ قابلٍ للذوبانِ. أيوناتُ الثيوسياناتِ، SCN^- يمكنُها أن تكوِّنَ ملحًا غيرَ قابلٍ للذوبانِ مع Ag^+ (هـ)، أو ملحًا قابلاً للذوبانِ مع Fe^{3+} (و).

مسألةٌ نموذجية 4-7

هل سيتكوَّنُ راسبٌ إذا خلطْتَ 20.0 mL من $0.010\ M\ BaCl_2$ مع 20.0 mL من $0.0050\ M\ Na_2SO_4$؟

الحلّ

1 حلّل

المعطى: تركيز $BaCl_2$ = 0.010 M
حجم $BaCl_2$ = 20.0 mL
تركيز Na_2SO_4 = 0.0050 M
حجم Na_2SO_4 = 20.0 mL

المجهول: هل يتكوَّنُ راسبٌ؟

2 خطِّطْ

المركَّبان المتوقَّعان نتيجةَ المزجِ هما NaCl و $BaSO_4$، وهو الملحُ الشحيحُ الذوبان. هذا الملحُ سيترسَّبُ إذا زادَ حاصلُ الأيوناتِ $[Ba^{2+}][SO_4^{2-}]$، في المحلولِ الناتجِ عن قيمةِ K_{sp} لـ $BaSO_4$. يبيِّنُ الجدولُ 7-3، أن K_{sp} لـ $BaSO_4$ تساوي 1.1×10^{-10}. ومعادلةُ تفكُّكِ $BaSO_4$ هي:

$$BaSO_4(s) \rightleftarrows Ba^{2+}(aq) + SO_4^{2-}(aq)$$

وتعبيرُ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ هو:

$$K_{sp} = [Ba^{2+}][SO_4^{2-}] = 1.1 \times 10^{-10}$$

يلزمُ بدايةً إيجادُ تراكيزِ كلٍّ من $[SO_4^{2-}]$، $[Ba^{2+}]$ في المحلولِ المذكورِ أعلاه. بعدَ ذلك يُحسبُ الحاصلُ الأيونيُّ، ويُقارنُ مع K_{sp}.

3 احسبْ

احسبْ كمِّيّاتِ الأيوناتِ Ba^{2+} و SO_4^{2-} بالمول.

$$0.020\ \cancel{L} \times \frac{0.010\ mol\ Ba^{2+}}{1\ \cancel{L}} = 0.000\ 20\ mol\ Ba^{2+}$$

$$0.020\ \cancel{L} \times \frac{0.0050\ mol\ SO_4^{2-}}{1\ \cancel{L}} = 0.000\ 10\ mol\ SO_4^{2-}$$

احسبِ الحجمَ الكلّيَّ للمحلولِ الذي يحتوي على أيوناتِ Ba^{2+} و SO_4^{2-}.

$$0.020\ L + 0.020\ L = 0.040\ L$$

احسبْ تركيزَيِ الأيونَيْن Ba^{2+} و SO_4^{2-} في المحلولِ الناتجِ.

$$\frac{0.000\ 20\ mol\ Ba^{2+}}{0.040\ L} = 5.0 \times 10^{-3}\ mol/L\ Ba^{2+}$$

$$\frac{0.000\ 10\ mol\ SO_4^{2-}}{0.040\ L} = 2.5 \times 10^{-3}\ mol/L\ SO_4^{2-}$$

احسبِ الحاصلَ الأيونيَّ.

$$[Ba^{2+}][SO_4^{2-}] = (5.0 \times 10^{-3})(2.5 \times 10^{-3}) = 1.2 \times 10^{-5}$$

الحاصلُ الأيونيُّ، 1.2×10^{-5}، هو أكبرُ من قيمةِ K_{sp}، 1.1×10^{-10}، إذن سيتكوَّنُ راسبٌ من $BaSO_4$.

4 قيِّمْ

يحتوي الجوابُ على العددِ المناسبِ من الأرقامِ المعنويَّةِ، وبما أن $(10^{-5} > 10^{-10})$ فسيتكوَّنُ راسبٌ.

تمارينُ تطبيقية

1. هل سيتكوَّنُ راسبٌ عندَ خلطِ 100. mL من محلول $AgNO_3$ 0.0025 M مع 150. mL من محلول NaBr 0.0020 M؟
2. هل سيتكوَّنُ راسبٌ عندَ خلطِ 20. mL من محلول $Pb(NO_3)_2$ 0.038 M مع 30. mL من محلول KCl 0.018 M؟

الجواب

1. AgBr يترسَّبُ
2. $PbCl_2$ لا يترسَّبُ

مراجعةُ القسم 4-7

1. ما المقصودُ بكلٍّ من:
ثابتِ حاصل الإذابةِ، الحاصلِ الأيونيِّ، الذوبانيَّةِ؟
2. كيفَ يُستخدمُ ثابتُ حاصلِ الإذابةِ لحسابِ الذوبانيَّةِ؟
3. ما قيمةُ K_{sp} لـ Ag_2SO_4 إذا علمْتَ بأن 5.40 g فقط من هذا الملح تذوبُ في 1.00 L من الماءِ؟
4. هل سيتكوَّنُ راسبٌ عندَ خلطِ 20.0 mL من 1.00×10^{-7} M $AgNO_3$ مع 20.0 mL من 2.00×10^{-9} M NaCl، وذلك عند درجةِ حرارةِ 25°C؟

تفكيرٌ ناقد

5. **تحليلُ بيانات:** يتكوَّنُ محلولٌ من المركَّباتِ التاليةِ بتركيزِ 0.20 M لكلٍّ منها: $Ca(NO_3)_2$، $Cr(NO_3)_3$، $La(NO_3)_3$. يضافُ إلى هذا المحلول NaF صلبٌ، حتى يبلغ $[F^-]$ في المحلول 1.0×10^{-4} M. إذا كانَتْ قيمُ K_{sp} كالتالي:
$CaF_2 = 3.9 \times 10^{-11}$؛ $CrF_3 = 6.6 \times 10^{-11}$؛
$LaF_3 = 4.0 \times 10^{-17}$
صِفْ ما يحدثُ.

مراجعةُ الفصل 7

ملخّصُ الفصل

1-7

- نظامُ التفاعلِ الذي يحدثُ فيه التفاعلان الأماميُّ والعكسيُّ، بشكلٍ متزامنٍ وبالسرعةِ نفسِها، يوصفُ بأنه في حالةِ الاتّزان. يستمرُّ التفاعلان المذكوران، لكن لا يحدثُ أيُّ تغييرٍ في تركيبِ النظام.
- إن نسبةَ حاصلِ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ للموادِّ الناتجةِ على حاصلِ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ للمتفاعلات، كلٌّ مرفوعٌ إلى أسٍّ يساوي مُعاملَه في المعادلةِ الموزونة، يكونُ لها في حالةِ الاتّزانِ قيمةٌ رقميَّةٌ محدَّدةٌ K التي هي ثابتُ الاتّزانِ عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ.

المفردات

التفاعلُ الانعكاسيُّ (177) reversible reaction

الاتزانُ الكيميائيُّ (178) chemical equilibrium

ثابتُ الاتّزانِ (180) equilibrium constant

2-7

- تبعًا لمبدأ لو شاتلييه، عندَما يتعرَّضُ نظامٌ متّزنٌ إلى توتّرٍ ما (تغيُّرٍ في التركيز، أو في الضغطِ أو في درجةِ الحرارةِ)، ينزاحُ الاتّزانُ إلى الاتّجاهِ الذي يقلّلُ من أثرِ هذا التوتُّرِ.
- يظهرُ تأثيرُ الأيونِ المشترَكِ عندَما يضافُ إلى نظامٍ متّزنٍ محلولٌ يحتوي على أيوناتٍ كتلك التي في متفاعلٍ أو في ناتجِ هذا النظام. ويفسِّرُ مبدأُ لو شاتلييه استجابةَ النظامِ لهذا التوتُّرِ.

المفردات

تأثيرُ الأيونِ المشترك (191) common-ion effect

3-7

- تعبيرُ ثابتِ الاتّزانِ لتأيُّنِ حمضٍ ضعيفٍ، HA، هو التالي:

$$K_a = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA]}$$

- تُنتجُ الأملاحُ المكوَّنةُ من قواعدَ قويَّةٍ وأحماضٍ ضعيفةٍ محاليلَ مائيَّةً لها صفةٌ قاعديَّةٌ، وذلك بسببِ التحللِ المائي للأنيون.
- تُنتجُ الأملاحُ المكوَّنةُ من أحماضٍ قويَّةٍ وقواعدَ ضعيفةٍ محاليلَ مائيَّةً حمضيَّةً، وذلك بسببِ التحللِ المائي للكاتيون.
- الأملاحُ المكوَّنةُ من أحماضٍ قويَّةٍ وقواعدَ قويَّةٍ، لا تخضعُ لتفاعلِ التحللِ في الماء؛ لذلك تكونُ محاليلُها متعادلةً.
- تُنتجُ الأملاحُ المكوَّنةُ من أحماضٍ ضعيفةٍ وقواعدَ ضعيفةٍ، محاليلَ قد تكونُ متعادلةً، أو حمضيّةً أو قاعديّةً، بحسبِ الكمِّيّاتِ النسبيةِ للتحللِ المائي للكاتيونِ والأنيون.

المفردات

ثابتُ تأيُّنِ الحمض (193) acid ionization constant

المحلولُ المنظَّمُ (194) buffer solution

التحللُ المائي (196) hydrolysis

4-7

- تكوِّنُ أيوناتُ الأملاحِ الشحيحةِ الذوبانِ محاليلَ مائيَّةً مشبعةً بتراكيزَ منخفضةٍ. ويعبِّرُ عن حاصلِ ضربِ تراكيزِ هذه الأيوناتِ (الحاصلِ الأيونيِّ) بتعبيرِ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ K_{sp}.

المفردات

ثابتُ حاصلِ الإذابةِ (201) solubility product constant

مراجعةُ الفصل 7

اختيارٌ من متعدِّد

1. يكونُ تفاعلٌ كيميائيٌّ في حالةِ اتّزانٍ عندَما

أ. يتوقّفُ التفاعلانِ الأماميُّ والعكسيُّ.

ب. يساوي ثابتُ الاتّزانِ 1.

ج. تكونُ سرعتا التفاعلَيْن، الأماميِّ والعكسيِّ متساويتَيْن.

د. لا يبقى متفاعلاتٌ.

2. أيٌّ ممّا يلي يمكنُ أن يغيِّرَ ثابتَ الاتّزانِ؟

أ. درجةُ الحرارةِ

ب. تركيزُ متفاعلٍ

ج. تركيزُ ناتجٍ

د. الضغط

3. تأمَّلِ التفاعلَ التاليَ:

$$2C(s) + O_2(g) \rightleftarrows 2CO(g)$$

تعبيرُ ثابتِ الاتّزانِ لهذا التفاعلِ هو

أ. $\frac{[CO]^2}{[O_2]}$ ج. $\frac{2[CO]}{[O_2][2C]}$

ب. $\frac{[CO]^2}{[O_2][C]^2}$ د. $\frac{[CO]}{[O_2]^2}$

4. ثابتُ حاصلِ الإذابةِ لكربوناتِ الكادميوم، $CdCO_3$، هو 1.0×10^{-12}. في محلولٍ مشبعٍ لهذا الملحِ، تركيزُ أيوناتِ الـ $Cd^{2+}(aq)$ (mol/L) هو

أ. 5.0×10^{-13}. ج. 1.0×10^{-6}.

ب. 1.0×10^{-12}. د. 5.0×10^{-7}.

5. تأمَّلِ المعادلةَ التاليةَ لنظامٍ متّزنٍ:

$$2PbS(s) + 3O_2(g) + C(s) \rightleftarrows 2Pb(s) + CO_2(g) + 2SO_2(g)$$

أيٌّ مما يلي يظهرُ تركيزُهُ في مقامِ تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ؟

أ. $SO_2(g)$، و $CO_2(g)$

ب. $C(s)$، و $O_2(g)$، و $PbS(s)$

ج. $SO_2(g)$، و $CO_2(g)$، و $O_2(g)$

د. $O_2(g)$

6. إذا بلغَ تفاعلٌ طاردٌ للحرارةِ حالةَ الاتّزانِ، فإن رفعَ درجةِ الحرارةِ

أ. يرجِّحُ التفاعلَ الأماميَّ.

ب. يرجِّحُ التفاعلَ العكسيَّ.

ج. يرجِّحُ التفاعلَيْن، الأماميَّ والعكسيَّ.

د. ليسَ له أيُّ تأثيرٍ على الاتّزانِ.

7. ينصُّ مبدأُ لو شاتيلييه على أنَّ

أ. سرعتَي التفاعلَيْن، الأماميِّ والعكسيِّ، متساويتانِ عندَ الاتّزانِ.

ب. التوتُّرَ ينشأُ عن تغيُّراتٍ في التركيزِ أو في الضغطِ أو في درجةِ الحرارةِ.

ج. كلاًّ من الموادِّ الصلبةِ والمذاباتِ تُحذفُ من تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ بهدفِ إزالةِ التوتُّرِ.

د. الاتّزانَ الكيميائيَّ يستجيبُ لتقليلِ التوتُّرِ المطبَّقِ على النظامِ.

مراجعةُ المفاهيم

8. صِفْ مع الشرحِ كيف تتغيَّرُ تراكيزُ A، B، C، D، منذُ اللحظةِ التي يتمُّ فيها أولاً اتحادُ A و B، إلى النقطةِ التي يتحقَّقُ فيها اتّزانُ التفاعلِ $A + B \rightleftarrows C + D$.

9. أ. اكتبِ التعبيرَ العامَّ لثابتِ الاتّزانِ، مستندًا إلى المعادلةِ $nA + mB + ... \rightleftarrows xC + yD + ...$

ب. أيُّ معلوماتٍ توفِّرُها قيمةُ الثابتِ K لنظامٍ متّزنٍ معيَّنٍ، عندَ درجةِ حرارةٍ محدَّدةٍ؟

10. أيُّ تفاعلٍ هو المرجَّحُ (الأماميُّ، أم العكسيُّ أم ليسَ واحدًا منهما) إذا كانَتْ قيمةُ K عندَ درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ

أ. تساوي 1؟

ب. قليلةً جدًّا؟

ج. كبيرةً جدًّا؟

11. توقَّعْ أيًّا من تغيُّرَيِ الضغطِ التاليَيْنِ يُرجِّحُ التفاعلَ الأماميَّ وأيُّهما يُرجِّحُ التفاعلَ العكسيَّ.

$$2NO(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO_2(g)$$

أ. ارتفاعُ الضغطِ

ب. انخفاضُ الضغطِ

12. أيُّ نوعٍ من الموادِّ في أنظمةِ التفاعلِ غيرِ المتجانسةِ، لا يظهرُ في تعبيرِ ثابتِ الاتّزانِ؟ لماذا؟

13. اشرحْ تأثيرَ الحفّازِ في نظامٍ متّزنٍ.

14. توقّعْ تأثيرَ كلٍّ من البنودِ المذكورةِ أدناه في الاتّزانِ الغازيِّ التالي، وذلك من حيثُ اتّجاهُ انزياحِ الاتّزان.

$H_2(g) + Cl_2(g) \rightleftarrows 2HCl(g) + 184\ kJ$

أ. إضافةُ Cl_2

ب. إزالةُ HCl

ج. ارتفاعُ الضغطِ

د. انخفاضُ درجةِ الحرارةِ

هـ. إزالةُ H_2

و. انخفاضُ الضغطِ

ز. إضافةُ حفّازٍ

ح. ارتفاعُ درجةِ الحرارةِ

ط. انخفاضُ حجمِ النظامِ

15. كيف تؤثّرُ التغيُّراتُ من (أ) إلى (ط) الواردةُ في المسألةِ 14 في تركيزِ الاتّزانِ الجديدِ لـ HCl، وفي قيمةِ K للاتّزانِ الجديدِ؟

16. وضّحْ لماذا لا يكونُ للتغيُّراتِ في تراكيزِ المتفاعلاتِ والنواتجِ في حالةِ الاتّزانِ تأثيرٌ في قيمِ ثابتِ الاتّزانِ.

17. أيُّ ضغطٍ (مرتفعٍ أو منخفضٍ) يحقّقُ إنتاجَ أعلى مستوى من CO_2 تبعًا للمعادلةِ التاليةِ؟ لماذا؟

$2CO(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2CO_2(g)$

18. أيُّ ظروفٍ (من تراكيزِ متفاعلاتٍ، وضغطٍ، ودرجةِ حرارةٍ) ترجّحُ تركيزَ اتّزانٍ عالٍ للمادّةِ التي تحتها خطٌّ في كلٍّ من أنظمةِ الاتّزانِ التاليةِ؟

أ. $2CO(g) + O_2(g) \rightleftarrows \underline{2CO_2(g)} + 167\ kJ$

ب. $Cu^{2+}(aq) + 4NH_3(aq) \rightleftarrows \underline{[Cu(NH_3)_4]^{2+}(aq)} + 42\ kJ$

ج. $2HI(g) + 12.6\ kJ \rightleftarrows + H_2(g) + \underline{I_2(g)}$

د. $4HCl(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2H_2O(g) + \underline{2Cl_2(g)} + 113\ kJ$

هـ. $PCl_5(g) + 88\ kJ \rightleftarrows PCl_3(g) + \underline{Cl_2(g)}$

19. تفاعلُ الهيموجلوبين، Hb، مع الأكسجينِ O_2 في خلايا الدمِ الحمراءِ هو المسؤولُ عن نقلِ الأكسجين، O_2، إلى أنسجةِ الجسمِ. يمكنُ لهذهِ العمليةِ أن تتمثّلَ بمعادلةِ الاتّزانِ التاليةِ: $Hb(aq) + O_2(g) \rightleftarrows HbO_2(aq)$.
ماذا سيحدثُ لتركيزِ الأوكسي هيموجلوبينِ HbO_2 على الارتفاعاتِ العاليةِ، حيثُ يساوي ضغطُ الأكسجينِ 0.1 atm بدلَ 0.2 atm (ضغطِ الأكسجينِ عندَ مستوى البحرِ)؟

20. حدّدِ الشروطَ الثلاثةَ التي تدفعُ التفاعلاتِ الأيونيّةَ إلى التقدُّمِ نحوَ الاكتمالِ، واكتبْ معادلةَ كلٍّ منها.

21. أ. اكتبْ تعبيرَ ثابتِ الحاصلِ الأيونيِّ للماءِ.

ب. ما قيمةُ هذا الثابتِ عند 25°C؟

22. اذكرِ الأنواعَ الأربعةَ العامّةَ للأملاحِ، وميِّزْ بينَها، مستندًا إلى خصائصِ التحللِ المائيِّ التي تخضعُ لها، وأعطِ مثالاً على كلٍّ منها.

23. وضِّحْ لماذا يكونُ pH للمحلولِ الذي يحتوي على حمضِ الأسيتيكِ وأسيتاتِ الصوديومِ معًا هو أعلى من pH لمحلولٍ يحتوي على حمضِ الأسيتيكِ فقط، وله التركيزُ نفسُه.

24. ثابتُ التأيُّنِ K_a لحمضِ الأسيتيكِ يساوي 1.8×10^{-5} عندَ 25°C، فسِّرْ دلالةَ هذه القيمةِ.

25. أ. بيِّنْ كيفَ يمكنُكَ أن تعبِّرَ عن ثابتِ التأيُّنِ، K_b، للقاعدةِ الضعيفةِ NH_3.

ب. إذا كانَ K_b يساوي 1.8×10^{-5}. ما دلالةُ هذه القيمةِ الرقميّةِ بخصوصِ الاتّزانِ؟

26. وضّحْ لماذا لا يكونُ المحلولُ المشبعُ بالضرورةِ محلولاً مركّزًا.

27. ما القاعدةُ العامّةُ التي تُستخدمُ للتمييزِ بينَ الموادِّ القابلةِ للذوبانِ وغيرِ القابلةِ للذوبانِ والشحيحةِ الذوبانِ؟

28. ما العلاقةُ بين K_{sp} والحاصلِ الأيونيِّ في تحديدِ كونِ المحلولِ مشبعًا؟

مسائل

29. احسبْ قيمةَ ثابتِ الاتّزانِ لكلٍّ من التفاعلاتِ الآتيةِ. (التراكيزُ بـ mol/L معطاةٌ عند الاتّزانِ)
(انظرِ المسألةَ النموذجيّةَ 7-1)

أ. $A + B \rightleftarrows C$، $[A] = 2.0$، $[B] = 3.0$، $[C] = 4.0$

ب. $D + 2E \rightleftarrows F + 3G$، $[D] = 1.5$، $[E] = 2.0$، $[F] = 1.8$، $[G] = 1.2$

ج. $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$
$[N_2] = 0.45$، $[H_2] = 0.14$، $[NH_3] = 0.62$

30. وجدَ أنَّ مكوِّنات نظام متَّزن، عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ، هي: 1.2×10^{-3} mol/L HCl، و 3.8×10^{-4} mol/L O_2، و 5.8×10^{-2} mol/L H_2O، و 5.8×10^{-2} mol/L Cl_2 تبعًا للمعادلة التالية:

$$4HCl(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2H_2O(g) + 2Cl_2(g)$$

احسبْ قيمةَ ثابتِ الاتِّزان لهذا النظام.

31. عندَ درجةِ حرارة 450°C، تبلغُ قيمةُ ثابتِ الاتِّزان للنظامِ الآتي 6.59×10^{-3}. فإذا كانتِ التراكيزُ عندَ الاتِّزان $[NH_3] = 1.23 \times 10^{-4}$ M، و $[H_2] = 2.75 \times 10^{-2}$ M احسبْ تركيزَ N_2 عند الاتِّزان.

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$$

32. في الاتِّزان الغازيِّ التالي: $H_2(g) + I_2(g) \rightleftarrows 2HI(g)$، تبلغُ قيمةُ ثابتِ الاتِّزان للتفاعل 40.0 عند درجةِ حرارةٍ محدَّدةٍ. كم ستكونُ قيمةُ هذا الثابتِ للتفاعلِ العكسيِّ تحتَ الظروفِ نفسِها؟

33. تتفكَّكُ المادَّةُ الأيونيَّةُ XY لتكوِّنَ الأيونات X^{2+} و Y^{2-} وتساوي ذوبانيَّتُها 8.45×10^{-6} mol/L. ما قيمةُ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ؟ (انظرِ المسألة النموذجيَّة 7-2)

34. احسبْ ثابتَ حاصلِ الإذابةِ K_{sp} لكلٍّ من المركَّباتِ الآتيةِ، مستندًا إلى المعلوماتِ المعطاةِ عن الذوبانيَّةِ.

أ. عند 20°C، $BaSO_4 = 2.4 \times 10^{-4}$ g/100. g H_2O

ب. عند 20°C، $Ca(OH)_2 = 0.173$ g/100. g H_2O

35. احسبِ الذوبانيَّةَ بالمول/لتر للمادَّةِ AB التي تتأيَّنُ لتكوِّنَ الأيونات A^{2+} و B^{2-}، علمًا أنَّ $K_{sp} = 8.1 \times 10^{-6}$. (انظرِ المسألة النموذجيَّة 7-3)

36. موظِّفًا قيمَ K_{sp} من الجدول 7-3، قيِّمْ ذوبانيَّةَ كلٍّ من المادتَيْنِ التاليتَيْنِ، معبِّرًا عنها بالمولاتِ في اللترِ.

أ. AgBr

ب. CoS

37. عندَ خلطِ 25.0 mL من 0.0500 M $Pb(NO_3)_2$ مع 25.0 mL من 0.0400 M Na_2SO_4 فإن تفاعلاً يحدثُ ويبلغُ حالةَ الاتِّزان عند 25°C. توصَّلْ إلى المعادلةِ الأيونيَّةِ الصرفةِ من خلالِ حساباتِ K_{sp}.

38. تتأيَّنُ المادةُ الأيونيَّةُ A_3B_2 لتكوِّنَ الأيونات A^{+2} و B^{3-} وتبلغُ ذوبانيَّةُ A_3B_2، 3.8×10^{-10} mol/L. ما قيمةُ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ؟

39. يحتوي محلولٌ من AgI على 2.7×10^{-10} mol/L Ag^+. ما أعلى تركيزٍ لـ I^- الذي يمكنُ أن يوجدَ في المحلولِ؟

40. اذا خُلطَ 0.35 L من 0.0044 M $Ca(NO_3)_2$ مع 0.17 L من 0.00039 M NaOH عندَ درجةِ حرارةٍ 25°C، فهل يتكوَّنُ راسبٌ؟ (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 7-4)

41. هل يتكوَّنُ راسبٌ إذا أُذيبَ 1.70 g من $AgNO_3$ و 14.5 g من NaCl في 200. mL من الماءِ، لتكوينِ محلولٍ عند 25°C؟

42. إذا أضيفَ 2.50×10^{-2} g من $Fe(NO_3)_3$ إلى 100. mL من محلول 1.0×10^{-4} M NaOH، فهل يتكوَّنُ راسبٌ؟

مراجعةٌ متنوِّعة

43. كربوناتُ الكالسيوم مادَّةٌ شحيحةُ الذوبانِ في الماءِ.

أ. اكتبْ معادلةَ الاتِّزان لكربوناتِ الكالسيوم في المحلول.

ب. اكتبْ تعبيرَ ثابتِ حاصلِ الإذابةِ، K_{sp}، لاتِّزانِ محلولٍ مشبعٍ بـ $CaCO_3$.

44. احسبْ تركيزَ أيوناتِ Hg^{2+} في محلولٍ مشبعٍ بـ $HgS(s)$، ما عددُ أيوناتِ Hg^{2+} في 1000 L من المحلولِ؟

45. احسبْ ثابتَ الاتِّزان، K للتفاعلِ التالي عند 900°C:

$$H_2(g) + CO_2(g) \rightleftarrows H_2O(g) + CO(g)$$

عندَ تحليلِ مكوِّناتِ النظامِ المتَّزنِ وُجدَ أنها كالتالي:

$[H_2] = 0.061$ mol/L، $[CO_2] = 0.16$ mol/L،

$[CO] = 0.14$ mol/L، $[H_2O] = 0.11$ mol/L

46. في محلولٍ مشبعٍ من فوسفاتِ الباريوم، يبلغُ تركيزُ أيونِ الباريوم 5.0×10^{-4} M، وتبلغُ قيمةُ K_{sp} 3.4×10^{-23}. احسبْ تركيزَ أيونِ الفوسفاتِ.

47. تبلغُ قيمةُ K، عند 25°C، للتفاعلِ التالي 1.7×10^{-13}.

$$2N_2O(g) + O_2(g) \rightleftarrows 4NO(g)$$

إذا علمْتَ أن التركيزَيْنِ التاليَيْنِ عند الاتِّزانِ هما: $[N_2O] = 0.0035$ mol/L و $[O_2] = 0.0027$ mol/L، فما قيمةُ تركيزِ $NO(g)$ عندَ الاتِّزانِ؟

48. يتركَّبُ ميناءُ السنِّ من المادَّةِ المعدنيَّةِ $Ca_5(PO_4)_3OH$ هيدروكسي أباتيت (hydroxyapatite) لهذا المركَّبِ K_{sp} تساوي 6.8×10^{-37}. وذوبانيَّتُه المولاريَّةُ تساوي 2.7×10^{-5} mol/L. إذا تفاعلَ الهيدروكسي أباتيت مع الفلوريدِ فستحلُّ الأيوناتُ F^- محلَّ الأيوناتِ OH^- في المركَّبِ المعدنيِّ، مكوِّنةً الفلورو أباتيت $Ca_5(PO_4)_3F$. (وهذا الأخيرُ هو مركَّبٌ أقسى ويقاومُ النخرَ) . فإذا علمْتَ أن K_{sp} للفلورو أباتيت 1×10^{-60}، احسبِ الذوبانيَّةَ بالمول/لتر للفلورو أباتيت في الماءِ. مستندًا إلى حساباتِك، هل يمكنُ أن تدعمَ فلوَرةَ مياهِ الشربِ؟

49. هل يتكوَّنُ راسبٌ عندَ خلطِ 0.96 g من Na_2CO_3 مع 0.20 g من $BaBr_2$، في 10. L من الماءِ؟ $(K_{sp} = 2.8 \times 10^{-9})$

50. أظهرَ حسابُ ثابتِ الاتِّزانِ لتفاعلِ تكوينِ الأمونيا أنه يساوي 5.2×10^{-5} عندَ 25°C. بعدَ إجراءِ التحليلِ تبيَّنَ أن $[N_2] = 2.00$ M، و $[H_2] = 0.80$ M. كم جرامًا من الأمونيا يوجدُ في وعاءِ تفاعُلٍ سعتُه 10. L، عندَ الاتِّزانِ؟ استخدمْ معادلةَ الاتِّزانِ التاليةَ:

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftarrows 2NH_3(g)$$

تفكيرٌ ناقد

51. ربطُ أفكار: لنفترضْ أن s تساوي الذوبانيَّةَ بـ mol/L للمركَّبِ AB_2. بالنسبةِ إلى s ما التركيزُ المولاريُّ لـ A؟ لـ B؟ احسبْ قيمةَ K_{sp} للمركَّبِ AB_2.

52. توقُّعُ نتائجَ: عندَما يحترقُ الجازولينُ في محرِّكِ السيّارةِ يتكوَّنُ أكسيدُ النيتريكِ من الأكسجينِ والنيتروجينِ. يُعدُّ أكسيدُ النيتريك ملوِّثًا أساسيًّا للهواء. ولكي يحدث التفاعلُ التالي تلزمُهُ درجاتُ حرارةٍ مرتفعةٌ كتلك التي تتوَلّدُ في محرِّكِ الاحتراقِ:

$$2N_2(g) + O_2(g) \rightleftarrows 2NO(g)$$

تساوي K لهذا التفاعلِ 0.01 عندَ 2000°C. فإذا وضعْتَ 4.0 mol من N_2، و 0.1 mol من O_2، و 0.08 mol من NO في وعاءٍ مغلقٍ سعتُه 1.0 L عندَ 2000°C، توقعْ أيَّ تفاعلٍ سيكونُ مرجَّحًا.

بحثٌ وكتابة

53. جِدْ صورًا لأمثلةٍ متعدِّدةٍ على الصواعدِ والهوابطِ في مغاورَ متعدِّدةٍ. ابحثْ عن عمليّاتِ الاتِّزانِ التي تساهمُ في تكوُّنِ الصواعدِ والهوابطِ في تلكَ الكهوفِ، ثمَّ اكتبْ تقريرًا علميًّا عن ذلك.

54. اكتبْ تقريرًا علميًّا حولَ استخدامِ الحفازّاتِ في العمليّاتِ الصناعيَّةِ. بيِّنْ أيَّ نماذجَ من الحفازّاتِ تُستخدمُ في عمليّاتٍ نوعيَّةٍ، كعمليَّةِ هابر.

تقويمٌ بديل

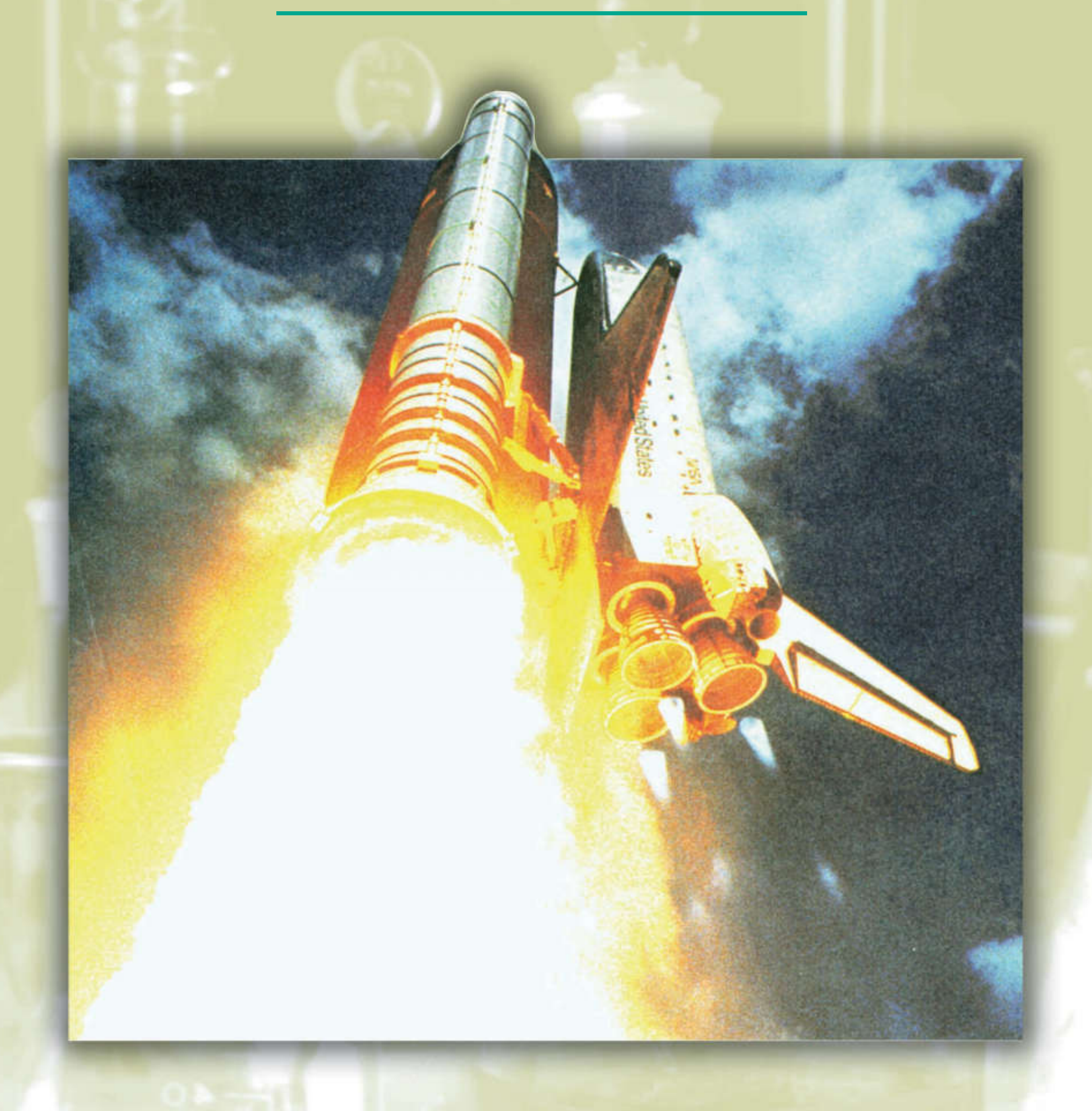
55. اكتبْ تقريرًا علميًّا عن المهدِّئاتِ النيتروجينيَّةِ. ما الذي يسبِّبُ «التخديرَ النيتروجينيّ» وكيفَ يرتبطُ بمبدأ لو شاتيلييه؟

مشروعٌ علميّ

56. موظِّفًا تقنيَّةَ الترسيبِ بواسطةِ إضافةِ الكبريتيداتِ، الهيدروكسيداتِ، الكربوناتِ، اعملْ على ترسيبِ الفلزّاتِ الثقيلةِ الذائبةِ في عيِّناتٍ من المياهِ الملوَّثةِ، موضحًا سلبيّاتِ كلِّ تقنيَّةٍ وإيجابيّاتِها.

الفصل 8

تفاعلاتُ الأكسدةِ والاختزالِ



تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالٍ تدفعُ الصواريخَ إلى الفضاءِ

القســـم 1-8

الأكسدةُ والاختزالُ

مؤشّراتُ الأداءِ

- يعينُ أعدادَ الأكسدةِ لأنواعِ المتفاعلاتِ والنواتجِ.
- يعرّفُ الأكسدةَ والاختزالَ.
- يفسِّرُ المقصودَ بتفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ.

تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالٍ تتضمَّنُ عمليَّةَ انتقالٍ للإلكتروناتِ. تتضمَّنُ الأكسدةُ فقدَ الإلكتروناتِ، بينما يتضمَّنُ الاختزالُ كسبَ الإلكتروناتِ. والتفاعلانِ النصفيّانِ للأكسدةِ والاختزالِ يجبُ أن يحدثا بشكلٍ متزامنٍ. يمكنُ تحديدُ هويَّةِ هذه العمليّاتِ من خلالِ فهمِ أعدادِ الأكسدةِ (حالات الأكسدة) وتوظيفِها.

أعدادُ الأكسدةِ

تمَّ تعريفُ أعدادُ الأكسدةِ في الفصل 1 من الصفِّ الحادي عشر. فعددُ الأكسدةِ المُعيَّنِ لعنصرٍ في جزيءٍ يستندُ إلى توزيعِ الإلكتروناتِ في هذا الجزيءِ. يقدّمُ هذا الفصلُ القواعدَ التي يتمُّ بواسطتِها تعيينُ أعدادِ الأكسدةِ. هذه القواعدُ ملخّصةٌ في الجدول 1-8.

الجدول 1-8 قواعدُ حسابِ أعدادِ الأكسدةِ

القاعدة	مثال
1. عددُ الأكسدةِ لأيِّ عنصرٍ غيرِ متّحدٍ يساوي صفرًا.	عددُ الأكسدةِ لـ $Na(s)$ هو صفر
2. عددُ الأكسدةِ للأيون أحاديِّ الذرَّةِ يساوي الشحنةَ على هذا الأيون.	عددُ الأكسدةِ لـ Cl^- هو 1−
3. في مركَّبٍ ثنائيِّ الذرَّةِ، يُعيَّنُ للعنصرِ الأكثرِ سالبيَّةً كهربائيَّةً عددُ أكسدةٍ يساوي الشحنةَ السالبةَ التي يمكنُ أن تكونَ له، لو كانَ أيونًا مفردًا.	عددُ الأكسدةِ لـ O في NO هو 2−
4. عددُ الأكسدةِ للفلورِ في أيِّ مركَّبٍ هو دائمًا 1−.	عددُ الأكسدةِ لـ F في LiF هو 1−
5. الأكسجينُ له عددُ أكسدةٍ 2−، إلا إذا كانَ متّحدًا مع F. حيثُ يكونُ لـ O عددُ الأكسدةِ 1+ أو 2+. أو إذا كانَ في البيروكسيدِ حيثُ يكونُ عددُ أكسدتِهِ 1−.	عددُ الأكسدةِ لـ O في NO_2 هو 2−
6. عددُ أكسدةِ الهيدروجين في معظم مركَّباتِهِ هو 1+، إلا إذا كانَ متّحدًا مع فلزٍّ نشطٍ، حيث يكونُ عددُ أكسدتِه 1−.	عددُ الأكسدةِ لـ H في LiH هو 1−
7. في مركَّباتِ عناصرِ المجموعةِ 1 والمجموعةِ 2، بالإضافةِ إلى مركَّباتِ عنصرِ الألمنيوم، تكونُ أعدادُ الأكسدةِ لهذهِ العناصرِ على التوالي 1+، 2+، 3+.	عددُ الأكسدةِ لـ Ca في $CaCO_3$ هو 2+
8. مجموعُ أعدادِ الأكسدةِ لجميعِ الذرّاتِ في مركَّبٍ متعادلٍ يساوي صفرًا.	عددُ الأكسدةِ لـ C في $CaCO_3$ هو 4+
9. مجموعُ أعدادِ الأكسدةِ لجميعِ الذرّاتِ في أيونٍ متعدِّدِ الذرّاتِ يساوي شحنةَ هذا الأيونِ.	عددُ الأكسدةِ لـ P في $H_2PO_4^-$ هو 5+

الشكل 8-1 تتغيَّرُ ألوانُ المحاليلِ التي تحتوي على الكرومِ مع تغيُّرِ عددِ أكسدةِ الكرومِ.

يقدِّمُ الكرومُ مثالاً مرئيًّا جيِّدًا لاختلافِ أعدادِ الأكسدةِ. حالاتُ أكسدةِ الكرومِ المختلفةُ لها ألوانٌ مختلفةٌ بشكلٍ قويٍّ، كما يبيِّنُ الشكلُ 8-1. محلولُ كلوريدِ الكرومِ (II) أزرقُ، محلولُ كلوريدِ الكرومِ (III) أخضرُ، محلولُ كروماتِ البوتاسيوم أصفرُ، محلولُ ثنائيِّ كروماتِ البوتاسيوم برتقاليٌّ.

الأكسدة

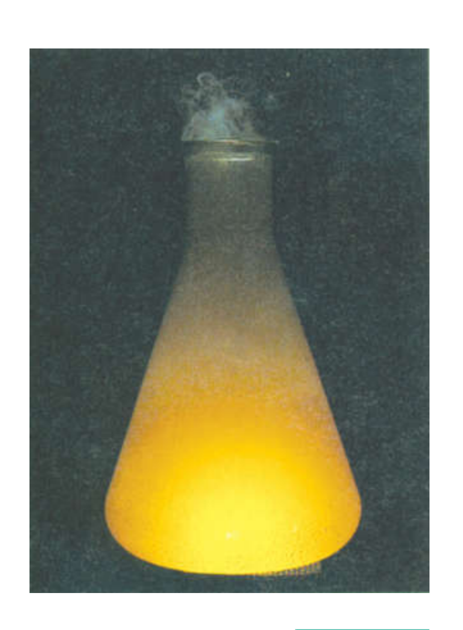
التفاعلاتُ التي تتعرَّضُ خلالها ذرّاتٌ أو أيوناتُ عنصرٍ لزيادةٍ في عددِ الأكسدةِ هي عمليّاتُ أكسدةٍ **oxidation**. يبيِّنُ الشكلُ 8-2 اتِّحادَ فلزِّ الصوديومِ مع غازِ الكلورِ. خلالَ هذا التفاعلِ الطاردِ للحرارةِ تكوِّنُ أيوناتُ الصوديومِ وأيوناتُ الكلوريدِ الناتجةُ شبكةً بلوريَّةً. في هذه الشبكةِ ترتبطُ كاتيوناتُ الصوديومِ برابطةٍ أيونيَّةٍ مع أنيوناتِ الكلوريدِ. المعادلةُ الكيميائيَّةُ لهذا التفاعلِ هي التالية:

$$2Na(s) + Cl_2(g) \rightarrow 2NaCl(s)$$

يمثِّلُ تَكَوُّنُ أيوناتِ الصوديومِ عمليَّةَ أكسدةٍ لأن كلَّ ذرَّةِ صوديوم فقدَتْ إلكترونًا لتصبحَ أيونًا من الصوديوم. تتمثَّلُ حالةُ الأكسدةِ بوضعِ عددِ الأكسدةِ فوقَ رمزِ الذرَّةِ أو الأيونِ.

$$\overset{0}{Na} \rightarrow \overset{+1}{Na^+} + e^-$$

تغيَّرَ عددُ أكسدةِ الصوديوم من 0، وهي حالةُ أكسدةِ العنصرِ، إلى +1 وهي حالةُ أكسدةِ الأيونِ (القاعدتان 1 و 7 في الجدول 8-1). النوعُ الذي يزدادُ عددُ أكسدتِهِ يتأكسدُ oxidized. ذرّةُ الصوديومِ تأكسدَتْ إلى أيونِ الصوديومِ.



الشكل 8-2 الصوديومُ والكلورُ يتفاعلانِ بشدَّةٍ ليكوِّنا كلوريدَ الصوديومِ. تركيبُ NaCl من عنصرَيْهِ هو عمليَّةُ أكسدةٍ–اختزالٍ.

الاختزال

***التفاعلاتُ التي يقلُّ فيها عددُ الأكسدةِ لعنصرٍ ما هي عمليّاتُ اختزالٍ* reduction**. تأمَّلْ سلوكَ الكلورِ في تفاعلِهِ مع الصوديومِ. كلُّ ذرَّةِ كلورٍ تستقبلُ إلكترونًا وتصبحُ أيونَ كلوريدٍ. تنخفضُ حالةُ أكسدةِ الكلورِ من 0 إلى 1− في أيونِ الكلوريدِ (القاعدتان 1 و 2، الجدول 8-1).

$$\overset{0}{Cl_2} + 2e^- \rightarrow \overset{-1}{2Cl^-}$$

النوعُ الذي يقلُّ فيه عددُ الأكسدةِ هو الذي يتمُّ اختزالُه reduced. ذرَّةُ الكلورِ اخْتُزِلَتْ إلى أيونِ الكلوريدِ.

الشكل 8-3 يتأكسدُ النحاسُ ويُنتجُ ثاني أكسيدِ النيتروجين عندما توضعُ قطعةُ النقودِ في محلولٍ مركزٍ من حمضِ النيتريكِ.

عمليّةُ الأكسدةِ والاختزالِ

في عمليّةِ الأكسدةِ تفقدُ المادَّةُ الإلكتروناتِ، وفي الاختزالِ تكتسبُها. لذلك، ولكي تحدثَ الأكسدةُ خلالَ تفاعلٍ كيميائيٍّ، يجبُ أن يحدثَ الاختزالُ أيضًا. ويجبُ، فضلاً عن ذلك، أن يساويَ عددُ الإلكتروناتِ المفقودةِ خلالَ الأكسدةِ عددَ الإلكتروناتِ المُكتسبةِ خلالَ الاختزالِ. وذلك لحفظِ الشحنةِ. ولقد تعلَّمتَ في الفصلِ 2 من الصفِّ الحادي عشرَ أن الكتلةَ تبقى ثابتةً في التفاعلِ الكيميائيِّ. لذلك تبقى كتلُ العناصرِ التي تخضعُ للأكسدةِ والاختزالِ ثابتةً. كما يستمرُّ التساوي بين الإلكتروناتِ المكتسبةِ والمفقودةِ.

انتقالُ الإلكتروناتِ يسبِّبُ تغيُّراتٍ في حالاتِ الأكسدةِ لواحدٍ أو أكثرَ من العناصرِ. ***كلُّ عمليَّةٍ كيميائيَّةٍ تخضعُ خلالَها عناصرُ لتغيُّراتٍ في عددِ الأكسدةِ هي تفاعلُ أكسدةٍ-اختزالٍ* oxidation-reduction reaction**. في الشكل 8-3، يمكنُ رؤيةُ مثالٍ على تفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ. يبيِّنُ هذا الشكلُ أكسدةَ النحاسِ واختزالَ الـ NO_3^- من حمضِ النيتريكِ. ***جزءُ التفاعلِ الذي يتضمَّنُ الأكسدةَ وحدَها أو الاختزالَ وحدَهُ يُكتبُ بصفتهِ تفاعلاً نصفيًّا* half-reaction**. المعادلةُ النهائيَّةُ لتفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ هي مجموعُ التفاعلَين النصفيَّين. وبما أن عددَ الإلكتروناتِ المشاركةِ هو نفسُهُ للأكسدةِ وللاختزالِ في هذا المثالِ، فيمكنُنا اختصارُه، ولا يظهرُ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ النهائيَّةِ. تُظهرُ معادلاتُ التفاعلِ بين حمضِ النيتريكِ والنحاسِ العلاقةَ بين التفاعلَين النصفيَّين وتفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ النهائيِّ.

$$\overset{0}{Cu} \rightarrow \overset{+2}{Cu^{2+}} + 2e^- \quad \text{(التفاعلُ النصفيُّ للأكسدةِ)}$$

$$2\overset{+5\,-2}{NO_3^-} + 2e^- + \overset{+1}{4H^+} \rightarrow 2\overset{+4\,-2}{NO_2} + 2\overset{+1\,-2}{H_2O} \quad \text{(التفاعلُ النصفيُّ للاختزالِ)}$$

$$\overset{0}{Cu} + 2\overset{+5}{NO_3^-} + 4H^+ \rightarrow \overset{+2}{Cu^{2+}} + 2\overset{+4}{NO_2} + 2H_2O \quad \text{(التفاعلُ النهائيُّ للأكسدةِ-اختزالٍ)}$$

لاحظْ أن الإلكتروناتِ المفقودةَ في الأكسدةِ تظهرُ في طرفِ النواتجِ للتفاعلِ النصفيِّ للأكسدةِ. تُكتسبُ الإلكتروناتُ في الاختزالِ وتظهرُ كمتفاعلاتٍ في التفاعلِ النصفيِّ للاختزالِ. عندما يتفاعلُ النحاسُ مع حمضِ النيتريكِ، تتأكسدُ ذرَّةُ نحاسٍ إلى Cu^{2+} عندما يتمُّ اختزالُ ذرَّتَيْ نيتروجينٍ من +5 إلى +4. وهذا ما يظهرُ في المعادلةِ الكيميائيَّةِ الموزونةِ لتفاعلِ النحاسِ مع حمضِ النيتريكِ.

إذا لم يتغيَّرْ عددُ الأكسدةِ لأيٍّ من الذرّاتِ في تفاعلٍ معيَّنٍ، فلا يكونُ التفاعلُ أكسدةً-اختزالاً. على سبيلِ المثالِ، يذوبُ غازُ ثاني أكسيدِ الكبريتِ في الماءِ ليكوِّنَ محلولاً حمضيًّا يحتوي على حمضِ الكبريتوز، H_2SO_3.

$$\overset{+4}{S}\overset{-2}{O_2} + \overset{+1}{H_2}\overset{-2}{O} \rightarrow \overset{+1}{H_2}\overset{+4}{S}\overset{-2}{O_3}$$

في تفاعلِ الاتِّحادِ هذا لا تتغيَّرُ أعدادُ الأكسدةِ لجميعِ أنواعِ العناصرِ. لذلك لا يكونُ التفاعلُ أكسدةً-اختزالاً.

عندَما يضافُ محلولُ كلوريدِ الصوديوم إلى محلولِ نيتراتِ الفضَّةِ، يحدثُ تفاعلُ الاستبدالِ الثنائيِّ للأيوناتِ، بينما يترسَّبُ كلوريدُ الفضَّةِ.

$$\overset{+1}{Na^+} + \overset{-1}{Cl^-} + \overset{+1}{Ag^+} + \overset{+5}{N}\overset{-2}{O_3^-} \rightarrow \overset{+1}{Na^+} + \overset{+5}{N}\overset{-2}{O_3^-} + \overset{+1}{Ag}\overset{-1}{Cl}$$

هنا لا تتغيَّرُ أعدادُ الأكسدةِ للذرّاتِ أو الأيوناتِ. لذا لا يكونُ هذا التفاعلُ أكسدةً-اختزالاً.

تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالٍ والروابطُ التساهميَّةُ

يتضمَّنُ كلا التفاعلَين تكوينَ NaCl من عناصرِه، والتفاعلُ بين النحاسِ وحمضِ النيتريكِ رابطةً أيونيَّةً. والموادُّ التي توجدُ فيها روابطُ تساهميَّةٌ تخضعُ أيضًا لتفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ. عددُ الأكسدةِ ليس له أيُّ معنًى فيزيائيٍّ، بخلافِ الشحنةِ الأيونيَّةِ. والواقعُ أن عددَ الأكسدةِ المخصَّصَ لذرَّةٍ مُعيَّنةٍ يستندُ إلى السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ لهذه الذرَّةِ بالنسبةِ إلى الذرّاتِ الأخرى التي ترتبطُ بها في جزيءٍ معيَّنٍ. هذا العددُ لا يستندُ إلى أيِّ شحنةٍ حقيقةٍ في الذرَّةِ. فالشحنةُ الأيونيَّةُ 1-، مثلاً، تَنتجُ بسببِ أن الذرَّةَ أو أيَّ مادَّةٍ أخرى متعادلةٍ تكسبُ إلكترونًا بشكلٍ تامٍّ. غيرَ أن عددَ الأكسدةِ 1- يعني زيادةً في جذبِ إلكترونِ الرابطةِ. فتغيُّرُ عددِ الأكسدةِ لا يتطلَّبُ تغيُّرًا في الشحنةِ الفعليَّةِ.

عندَما يتفاعلُ الهيدروجينُ مع الكلورِ تتكوَّنُ رابطةٌ تساهميَّةٌ بمشاركةِ إلكترونَين. وإن زوجَ الإلكتروناتِ هذا ينجذبُ بقوَّةٍ أكبرَ إلى ذرَّةِ الكلورِ بسببِ السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ الأعلى لهذه الذرَّةِ.

$$\overset{0}{H_2} + \overset{0}{Cl_2} \rightarrow 2\overset{+1}{H}\overset{-1}{Cl}$$

كما هو محدَّدٌ في القاعدةِ 3 للجدولِ 8-1، فإن الكلورَ، في HCl، له عددُ الأكسدةِ 1-. هكذا يتغيَّرُ عددُ الأكسدةِ في ذرّاتِ الكلورِ من 0، وهو عددُ الأكسدةِ لعنصرِ الكلورِ، إلى 1-، وبذلك تكونُ ذرّاتُ الكلورِ قد اختُزِلَتْ. وكما هو محدَّدٌ في القاعدةِ 1، فإن عددَ الأكسدةِ لكلِّ ذرَّةِ هيدروجينٍ في جزيءِ الهيدروجينِ هو 0، وإنَّ عددَ الأكسدةِ لذرَّةِ الهيدروجينِ في جزيءِ الـ HCl هو +1، كما هو في القاعدةِ 6. وبذلك تكونُ ذرَّةُ الهيدروجينِ قد تأكسدَتْ.

الكيمياءُ التطبيقيَّةُ

العدساتُ الضوءُ-لونيَّةُ

تُعتِّمُ النظّاراتُ الضوءُ-لونيَّةُ photochromic عندَما تتعرَّضُ للأشعةِ فوقَ البنفسجيَّةِ. وفي غيابِ هذه الأشعَّةِ تصبحُ شفّافةً من جديدٍ. هذه العمليَّةُ نتيجةٌ لتفاعلاتِ أكسدةٍ-اختزالٍ. كلوريدُ الفضَّةِ وكلوريدُ النحاسِ (I) ممتزجانِ في العدساتِ. تمتصُّ أيوناتُ الكلوريدِ الفوتوناتِ فيتفكَّكُ كلوريدُ الفضةِ ليكوِّنَ ذرّاتِ الكلورِ والفضَّةِ. عنصرُ الفضَّةِ هذا يعتِّمُ العدساتِ. تجدرُ الملاحظةُ هنا إلى أن أيوناتِ الكلوريدِ تأكسدَتْ، بينما اختُزِلَتْ أيوناتُ الفضَّةِ. ثم تَختزلُ أيوناتُ النحاسِ (I) ذرّاتِ الكلورِ لتكوِّنَ أيوناتِ النحاسِ (II). وفي العمليَّةِ العكسيَّةِ، تعودُ أيوناتُ النحاسِ (II) لتؤكسدَ ذرّاتِ الفضَّةِ إلى أيوناتِ الفضَّةِ الشفافةِ.

في الرابطةِ التساهميَّةِ لا يوجدُ فقدٌ أو اكتسابٌ كليٌّ للإلكتروناتِ. فالهيدروجينُ يساهمُ بإلكترونٍ في رابطتِهِ مع الكلورِ، لكنه لا يفقدُ هذا الإلكترونَ بشكلٍ تامٍّ للذرَّةِ ذاتِ السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ الأعلى. وهنا يمكنُنا أن نؤكِّدَ أن الذرَّةَ الأعلى في السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ تحملُ عددَ الأكسدةِ ذا القيمةِ السالبةِ، بينما تحملُ الذرَّةُ الأقلُّ سالبيَّةً عددَ الأكسدةِ الموجبَ.

لا تنحصرُ المتفاعلاتُ والنواتجُ في تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ بالأيوناتِ أحاديَّةِ الذرَّةِ والعناصرِ غيرِ المتحدةِ. فالعناصرُ في المركَّباتِ الجزيئيَّةِ أو الأيوناتِ متعدِّدةِ الذرّاتِ يمكنُها أيضًا أن تتأكسدَ أو تُختزلَ، إذا كان لها أكثرُ من حالةِ أكسدةٍ غيرِ مساويةٍ للصفرِ. يقدِّمُ التفاعلُ بين قطعةِ نقودٍ نحاسيَّةٍ وحمضِ النيتريكِ مثالاً على ذلك. ففي هذا التفاعلِ يتحوَّلُ أيونُ النيتراتِ، NO_3^-، إلى ثاني أكسيدِ النيتروجينِ، NO_2، حيثُ يتمُّ اختزالُ النيتروجينِ. نُرجعُ عادةً الأكسدةَ أو الاختزالَ إلى الجزيءِ أو إلى الأيونِ بكاملِه. فبدلاً من القول اختُزِلتْ ذرَّةُ النيتروجينِ نقولُ اختُزِلَ أيونُ النيتراتِ إلى ثاني أكسيدِ النيتروجينِ.

$$\ldots + \overset{+5}{N}O_3^- \rightarrow \overset{+4}{N}O_2 + \ldots$$

مراجعةُ القسم 1-8

1. كيف تُحسبُ أعدادُ الأكسدةِ؟
2. صنِّفْ كلاً من التفاعلاتِ النصفيَّةِ التاليةِ إلى تفاعلٍ نصفيٍّ للأكسدةِ أو تفاعلٍ نصفيٍّ للاختزالِ:
   - أ. $\overset{0}{Br_2} + 2e^- \rightarrow 2\overset{-1}{Br^-}$
   - ب. $\overset{0}{Na} \rightarrow \overset{+1}{Na^+} + e^-$
   - ج. $2\overset{-1}{Cl^-} \rightarrow \overset{0}{Cl_2} + 2e^-$
   - د. $\overset{0}{Cl_2} + 2e^- \rightarrow 2\overset{-1}{Cl^-}$
   - هـ. $\overset{+1}{Na^+} + e^- \rightarrow \overset{0}{Na}$
   - و. $\overset{0}{Fe} \rightarrow \overset{+2}{Fe^{2+}} + 2e^-$
   - ز. $\overset{+2}{Cu^{2+}} + 2e^- \rightarrow \overset{0}{Cu}$
   - ح. $\overset{+3}{Fe^{3+}} + e^- \rightarrow \overset{+2}{Fe^{2+}}$
3. أيٌّ من المعادلاتِ التاليةِ تمثِّلُ تفاعلاتِ أكسدةٍ-اختزالٍ؟
   - أ. $2KNO_3(s) \rightarrow 2KNO_2(s) + O_2(g)$
   - ب. $H_2(g) + CuO(s) \rightarrow Cu(s) + H_2O(l)$
   - ج. $NaOH(aq) + HCl(aq) \rightarrow NaCl(aq) + H_2O(l)$
   - د. $H_2(g) + Cl_2(g) \rightarrow 2HCl(g)$
   - هـ. $SO_3(g) + H_2O(l) \rightarrow H_2SO_4(aq)$
4. حدِّدْ: أيُّ عنصرٍ تأكسدَ وأيُّ عنصرٍ اختُزِلَ في كلٍّ من معادلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ التي حُدِّدَتْ في السؤالِ السابقِ.

تفكيرٌ ناقد

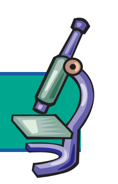
5. **تحليلُ معلومات:** استخدمِ المعادلاتِ التاليةَ لتفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ بين أيونِ الألمنيوم وفلزِّ الصوديوم، لتجيبَ عمّا يليها من أسئلةٍ.

$$3\overset{0}{Na} \rightarrow 3\overset{+1}{Na^+} + 3e^- \quad \text{(تفاعلُ أكسدةٍ)}$$

$$\overset{+3}{Al^{3+}} + 3e^- \rightarrow \overset{0}{Al} \quad \text{(تفاعلُ اختزالٍ)}$$

$$3\overset{0}{Na} + \overset{+3}{Al^{3+}} \rightarrow 3\overset{+1}{Na^+} + \overset{0}{Al} \quad \text{(تفاعلُ أكسدةٍ-اختزالٍ)}$$

   - أ. وضِّحْ كيف يُظهرُ هذا التفاعلُ أن الشحنةَ تحفظُ في التفاعلِ النهائيِّ.
   - ب. وضِّحْ كيف يُظهرُ هذا التفاعلُ أن الكتلةَ تحفظُ في التفاعلِ النهائيِّ.
   - ج. فسِّرْ عدمَ ظهورِ الإلكتروناتِ كمتفاعلاتٍ أو كنواتجَ في المعادلةِ النهائيَّةِ.



قراءةٌ علميَّةٌ

إزالةُ الرائحةِ الكريهةِ من جلودِ الحيواناتِ الأليفةِ

هل أعطيْتَ مرَّةً حيوانَكَ الأليفَ حمّامًا من عصيرِ الطماطمِ للتخلُّصِ من الرائحةِ الكريهةِ المنبعثةِ من جلدِهِ؟ تقدِّمُ الكيمياءُ طريقةً أفضلَ بكثيرٍ للتغلُّبِ على الرائحةِ الكريهةِ.

يقولُ بول كريباوم، وهو مبتكرُ صيغةٍ حديثةٍ لإزالةِ الرائحةِ الكريهةِ المنبعثةِ من جلودِ الحيواناتِ، إنه أثناءَ عملِهِ كمهندسِ موادَّ، كان عليه أن يتعاملَ مع موادَّ ذاتِ رائحةٍ كريهةٍ جدًّا ناتجةٍ عن غازِ كبريتيدِ الهيدروجينِ الذي كانتْ تطلقُهُ واحدةٌ من تجاربِهِ. إنّ تهويةَ هذا الغازِ تحلُّ المشكلةَ جزئيًّا فقط، لكنَّ الحلَّ الأفضلَ هو في إزالةِ هذه الرائحةِ بشكلٍ تامٍّ.

بحثَ السيدُ كريباوم في كتبِهِ القديمةِ للكيمياءِ فوجدَ أن بيروكسيدَ الهيدروجينِ يمكنُهُ أن يؤكسدَ هذه المركَّباتِ المحتويةَ على الكبريتِ ليحوِّلَها إلى مركَّباتٍ ذاتِ روائحَ أقلَّ كرهًا بكثيرٍ. فعمدَ فورًا وبسرعةٍ إلى تحضيرِ خليطٍ يحتوي على بيروكسيدِ الهيدروجينِ. هذا الخليطُ أظهرَ نتيجةً فعّالةً جدًّا.

تبيِّنُ المعادلةُ اللاحقةُ أن كبريتيدَ الهيدروجينِ يتفاعلُ مع H_2O_2 ليكوِّنَ مركَّباتِ الكبريتاتِ التي لا تبعثُ رائحةً كريهةً.

$$2NaOH + 4H_2O_2 + H_2S \rightarrow Na_2SO_4 + 6H_2O$$

«المستقبلاتُ الحسيَّةُ الموجودةُ في أنفِكَ حساسةٌ تجاهَ الكبريتِ عندما يكونُ في حالةِ أكسدتِهِ المنخفضةِ»، يقولُ السيدُ كريباوم، وهي مع ذلك ليستْ حسّاسةً تجاهَ الكبريتِ عندما يكونُ في حالةِ أكسدتِهِ العاليةِ.

يكتسبُ الرذاذُ الدهنيُّ على جلدِ الحيوانِ رائحتَهُ من موادَّ كيميائيَّةٍ تسمّى مركبتاناتٍ.

بعد فترةٍ من الزمنِ، اشتكى صديقٌ للسيدِ كريباوم أن رائحةَ حيوانِهِ الأليفِ تأتي من مركَّباتٍ تحتوي على الكبريتِ في حالةِ أكسدةٍ منخفضةٍ. فكَّرَ السيدُ كريباوم أن محلولَهُ قد يعملُ أيضًا على حلِّ هذه المسألةِ القديمةِ. فخلطَ ليجرِّبَ على الحيوانِ الأليفِ عيِّنةً معتدلةً مُكَوَّنةً من: $1\ L$ من 3% محلولِ بيروكسيدِ الهيدروجينِ، $1/4$ كوبٍ من صودا الخبيزِ، وملعقةٍ صغيرةٍ من الصابونِ السائلِ. جرَّبَ صديقُ كريباوم هذا الخليطَ، فكانَتِ النتيجةُ حيوانًا مبلَّلاً غيرَ فرحٍ، لكن برائحةٍ أدنى بكثيرٍ.

يقولُ السيدُ كريباوم إنَّ بيروكسيدَ الهيدروجينِ في الدواءِ يؤكسدُ فعلاً المركَّباتِ، بينما تخفِّفُ صودا الخبيزِ حمضيَّةَ الخليطِ. ويساعدُ الصابونُ على غسلِ الرذاذِ الدهنيِّ عن جلدِ الحيوانِ.

هذا التفاعلُ يمكننا رؤيتُهُ في المعادلةِ التاليةِ. الرمز R يمثِّلُ جميعَ العناصرِ التي يحتوي عليها الرذاذُ كريهُ الرائحةِ، عدا الكبريتِ.

$$RSH + 3H_2O_2 + NaHCO_3 \rightarrow RSO_3Na + 4H_2O + CO_2$$

كان يلزمُ غسلُ الحيوانِ الأليفِ بهذا الخليطِ بشكلٍ تامٍّ، وكان يجبُ الانتباهُ لوقايةِ العيونِ. فإذا تُركَ الخليطُ عدَّةَ دقائقَ – وهذا الوقتُ كافٍ لحدوثِ التفاعلِ – وتمَّ بعدها غسلُهُ بماءِ الصنبورِ تختفي الرائحةُ.

هذه الصيغةُ لا تُغيِّرُ في الألوانِ أو تسبِّبُ أيَّ تأثيراتٍ سلبيَّةٍ أخرى. لكنّ السيدَ كريباوم نبَّهَ إلى إرشادٍ واحدٍ قائلاً: اخلطِ الصيغةَ تمامًا قبل استخدامِها، لأن الخليطَ يتعطَّلُ بسرعةٍ. يُطلقُ التفاعلُ الأكسجينَ، لذلك يجبُ ألاّ تحفظَ الصيغةُ في وعاءٍ محكمِ السدِّ. فالضغطُ المتكوِّنُ يؤدّي في نهايةِ الأمرِ إلى تفجيرِ الوعاءِ. لذلك لن تظهرَ قناني «دواءِ كريباوم لإزالةِ الرائحةِ الكريهةِ» على رفوفِ الصيدليّاتِ في وقتٍ قريبٍ.

أسئلة

1. ماذا نتجَ عن بحثِ بول كريباوم في خصائصِ H_2S من فائدةٍ لمالكي الحيواناتِ الأليفةِ؟
2. أيًّا من تصاميمِ التعليبِ كان يمكنُ للسيِّدِ كريباوم أن يستخدمَ لو أنه أرادَ بيعَ صيغتِهِ؟

القسم 2-8

مؤشّراتُ الأداءِ

- يكتبُ التفاعلاتِ النصفيَّةَ لكلٍّ من الأكسدةِ والاختزالِ.
- يطبِّقُ حفظَ الكتلةِ والشحنةِ في معادلاتِ الأكسدةِ والاختزالِ.
- يزنُ معادلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ باستخدامِ طريقةِ التفاعلِ النصفيِّ.

وزنُ معادلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ

يمكنُ وزنُ معادلاتِ تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ البسيطةِ، بالمعاينةِ كما تعلَّمتَ أن تفعلَهُ في الفصلِ 2 من الصفِّ الحادي عشر. ومع ذلك فإن معظمَ معادلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ تتطلَّبُ طرقًا أكثرَ منهجيَّةً. تتطلَّبُ عمليَّةُ وزنِ المعادلةِ استخدامَ أعدادِ الأكسدةِ. في معادلةٍ موزونةٍ تُحفظُ الشحنةُ والكتلةُ. وبالرغمِ من أن التفاعلَين النصفيَّين، الأكسدةَ والاختزالَ، يحدثانِ معًا فإن معادلتَيّ تفاعلِهما توزَنانِ بشكلٍ منفصلٍ، ثم يتمُّ جمعُهما ليعطيا المعادلةَ الموزونةَ لتفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ.

طريقةُ التفاعلِ النصفيِّ

تتألفُ طريقةُ التفاعلِ النصفيِّ، أو طريقةُ أيون-إلكترون لوزنِ معادلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ من سبعِ خطواتٍ. لتحديدِ الأنواعِ المشاركةِ في عمليَّةِ الأكسدةِ-اختزالٍ تُعيَّنُ أعدادُ الأكسدةِ لجميعِ الذرّاتِ والأيوناتِ المتعدِّدةِ الذرّاتِ. توزنُ معادلاتُ الأكسدةِ والاختزالِ بشكلٍ منفصلٍ بالنسبةِ إلى الكتلةِ والشحنةِ. ثم يتمُّ جمعُهما معًا، لينتجا معادلةً موزونةً تامَّةً. هذه الخطواتُ السبعُ تطبَّقُ لوزنِ معادلةِ تفاعلِ كبريتيدِ الهيدروجينِ وحمضِ النيتريك. يُنتِجُ هذا التفاعلُ حمضَ الكبريتيكِ وثانيَ أكسيدِ النيتروجينِ والماءَ.

1. اكتبِ المعادلةَ بالصيغِ إذا لم تكنْ معطاةً في المسألةِ. ثم اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ.

المعادلةُ بالصيغِ: $H_2S + HNO_3 \rightarrow H_2SO_4 + NO_2 + H_2O$

المعادلةُ الأيونيَّةُ: $H_2S + H^+ + NO_3^- \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-} + NO_2 + H_2O$

2. عيِّنْ أعدادَ الأكسدةِ. احذفْ فقط الموادَّ المحتويةَ على عناصرَ لا تتغيَّرُ أعدادُ أكسدتِها.

$$\overset{+1\ -2}{H_2S} + \overset{+1}{H^+} + \overset{+5\ -2}{NO_3^-} \rightarrow \overset{+1}{2H^+} + \overset{+6\ -2}{SO_4^{2-}} + \overset{+4\ -2}{NO_2} + \overset{+1\ -2}{H_2O}$$

يتغيَّرُ عددُ أكسدةِ الكبريتِ من 2– إلى 6+. كذلك يتغيَّرُ عددُ أكسدةِ النيتروجينِ من 5+ إلى 4+. لذلك تُحذفُ الموادُّ الأخرى.

$$\overset{+1\ -2}{H_2S} + \overset{+5\ -2}{NO_3^-} \rightarrow \overset{+6\ -2}{SO_4^{2-}} + \overset{+4\ -2}{NO_2}$$

الموادُّ الباقية تُستخدمُ في الخطوةِ 3.

3. **اكتبِ التفاعلَ النصفيَّ للأكسدةِ.** في هذا المثال يتأكسدُ الكبريتُ.

$$\overset{-2}{H_2S} \rightarrow \overset{+6}{SO_4^{2-}}$$

- **زنِ الذرّاتِ** (مبتدئًا بالذرّاتِ غير O و H، وهي موزونةٌ في هذا المثال). لوزنِ الأكسجين في التفاعلِ النصفيِّ هذا، يجبُ أن يضافَ 4 جزيئاتٍ H_2O إلى الطرفِ الأيسرِ. هذا الأمرُ يعطي 10 ذرّاتِ هيدروجين إضافيَّةٍ على هذا الطرفِ من المعادلةِ. لذلك يُضافُ 10 أيوناتِ هيدروجين إلى الطرفِ الأيمنِ (في محلولٍ قاعديٍّ، يمكنُ استخدامُ أيوناتِ OH^- وماءٍ لوزنِ الذرّاتِ).

$$\overset{-2}{H_2S} + 4H_2O \rightarrow \overset{+6}{SO_4^{2-}} + 10H^+$$

- **زنِ الشحنةَ.** تضافُ الإلكتروناتُ إلى الطرفِ الذي يتمتَّعُ بالشحنةِ الموجبةِ الإجماليَّةِ الأكبرِ. لا يوجدُ في الطرفِ الأيسرِ للمعادلةِ شحنةٌ، في حين أن الطرفَ الأيمنَ له شحنةٌ إجماليَّةٌ +8. لموازنةِ الشحناتِ يجبُ أن يكونَ لكلِّ طرفٍ الشحنةُ الإجماليَّةُ نفسُها. لذلك يُضافُ 8 إلكتروناتٍ إلى طرفِ النواتجِ، بحيثُ لا يعودُ لهذا الطرفِ أيُّ شحنةٍ، ويتوازنُ مع طرفِ المتفاعلاتِ في المعادلةِ. ويجدرُ بالملاحظةِ أن أكسدةَ الكبريتِ من الحالةِ 2– إلى 6+ يشيرُ إلى فقدِ 8 إلكتروناتٍ.

$$\overset{-2}{H_2S} + 4H_2O \rightarrow \overset{+6}{SO_4^{2-}} + 10H^+ + 8e^-$$

الآن تمَّ وزنُ التفاعلِ النصفيِّ للأكسدةِ.

4. **اكتبِ التفاعلَ النصفيَّ للاختزال.** في هذا المثال اختُزِلَ النيتروجينُ من الحالةِ 5+ إلى الحالةِ 4+.

$$\overset{+5}{NO_3^-} \rightarrow \overset{+4}{NO_2}$$

- **زنِ الذرّاتِ.** يجبُ إضافةُ جزيءٍ H_2O إلى طرفِ النواتجِ للتفاعلِ لوزنِ ذرّاتِ الأكسجين. لذلك يجبُ إضافةُ أيونَيْ هيدروجين إلى طرفِ المتفاعلاتِ لوزنِ ذرّاتِ الهيدروجين.

$$\overset{+5}{NO_3^-} + 2H^+ \rightarrow \overset{+4}{NO_2} + H_2O$$

- **زنِ الشحنةَ.** تضافُ الإلكتروناتُ إلى الطرفِ الذي يتمتَّعُ بالشحنةِ الموجبةِ الإجماليَّةِ الأكبرِ. الطرفُ الأيمنُ للمعادلةِ لا يوجدُ عليه شحنةٌ، أما الطرفُ الأيسرُ فله شحنةٌ إجماليَّةٌ تساوي 1+. لذلك يجبُ إضافةُ 1 إلكترونٍ إلى هذا الطرفِ لوزنِ الشحنةِ.

$$\overset{+5}{NO_3^-} + 2H^+ + e^- \rightarrow \overset{+4}{NO_2} + H_2O$$

الآنَ تمَّ وزنُ التفاعلِ النصفيِّ للاختزالِ.

5. **تحقَّقْ من حفظِ الشحنةِ بضبطِ المُعاملاتِ وتعديلِها أمامَ الإلكتروناتِ، بحيث يكونُ عددُ الإلكتروناتِ المفقودةِ في الأكسدةِ مساويًا لعددِ الإلكتروناتِ المكتسبةِ في الاختزالِ.**
اكتبْ نسبةَ عددِ الإلكتروناتِ المفقودةِ إلى عددِ الإلكتروناتِ المكتسَبةِ.

$$\frac{\text{عدد } e^- \text{ المفقود في الأكسدة}}{\text{عدد } e^- \text{ المكتسَب في الاختزال}} = \frac{8}{1}$$

في هذه النسبةِ تظهرُ الأرقامُ الأبسطُ. وإذا لم تكنْ كذلك فتحتاجُ إلى اختصار. اضربِ التفاعلَ النصفيَّ للأكسدةِ في 1 (فتبقى كما هي) واضربِ التفاعلَ النصفيَّ للاختزال في 8، فيصبحُ عددُ الإلكتروناتِ المفقودةِ مساويًا لعددِ الإلكتروناتِ المكتسبةِ.

$$1(H_2\overset{-2}{S} + 4H_2O \rightarrow \overset{+6}{S}O_4^{2-} + 10H^+ + 8e^-)$$

$$8(\overset{+5}{N}O_3^- + 2H^+ + e^- \rightarrow \overset{+4}{N}O_2 + H_2O)$$

6. اجمعِ التفاعلَينِ النصفيَّيْنِ واختصرْ كلَّ ما هو مشتركٌ في طرفَي المعادلةِ.

$$H_2\overset{-2}{S} + 4H_2O \rightarrow \overset{+6}{S}O_4^{2-} + 10H^+ + 8e^-$$

$$8\overset{+5}{N}O_3^- + 16H^+ + 8e^- \rightarrow 8\overset{+4}{N}O_2 + 8H_2O$$

$$8\overset{+5}{N}O_3^- + \overset{6}{\cancel{16}}H^+ + \cancel{8e^-} + H_2\overset{-2}{S} + \cancel{4H_2O} \rightarrow$$

$$8\overset{+4}{N}O_2 + \overset{4}{\cancel{8}}H_2O + \overset{+6}{S}O_4^{2-} + \cancel{10}H^+ + \cancel{8e^-}$$

كلُّ طرفٍ من هذه المعادلةِ يتوفَّرُ فيه $10H^+$ و $8e^-$ و $4H_2O$. وهذه يمكنُ حذفُها فلا تظهرُ مجدَّدًا في المعادلةِ الموزونةِ.

$$8\overset{+5}{N}O_3^- + H_2\overset{-2}{S} + 6H^+ \rightarrow 8\overset{+4}{N}O_2 + 4H_2O + \overset{+6}{S}O_4^{2-}$$

7. أعدِ الأيوناتِ التي تمَّ حذفُها في الخطوةِ 2، ثم تأكَّدْ أن جميعَ الأيوناتِ الأخرى موزونةٌ. أيون NO_3^- ظهرَ بشكلِ حمضِ النيتريك في المعادلةِ الأصليَّةِ. يوجدُ فقط 6 أيوناتِ هيدروجينٍ للمزاوجةِ مع 8 أيوناتِ نيتراتٍ. لذلك يجبُ أن يضافَ أيونا هيدروجينٍ لإتمامِ هذه الصيغةِ. فإذا أضيفَ أيونا هيدروجينٍ إلى الطرفِ الأيسرِ للمعادلةِ يلزمُ إضافةُ أيونَيْ هيدروجينٍ كذلك إلى الطرفِ الأيمنِ للمعادلةِ.

$$8HNO_3 + H_2S \rightarrow 8NO_2 + 4H_2O + SO_4^{2-} + 2H^+$$

أيونُ الكبريتاتِ يظهرُ بشكلِ حمضِ الكبريتيكِ في المعادلةِ الأصليَّةِ. أيوناتُ الهيدروجينِ المضافةُ إلى الطرفِ الأيمنِ استُخدِمَتْ لإتمامِ صيغةِ حمضِ الكبريتيكِ.

$$8HNO_3 + H_2S \rightarrow 8NO_2 + 4H_2O + H_2SO_4$$

يجبُ إجراءُ مراجعةٍ نهائيَّةٍ للتأكُّدِ من أن جميعَ العناصرِ موزونةٌ بشكلٍ صحيحٍ.

الشكل 4-8 عندَ معايرةِ محلولِ $KMnO_4$ مع محلولٍ حمضيٍّ لـ $FeSO_4$ يتمُّ اختزالُ أيوناتِ MnO_4^- الأرجوانيَّةِ الداكنةِ إلى أيوناتِ Mn^{2+} العديمةِ اللونِ. عندما تتأكسدُ جميعُ أيوناتِ Fe^{2+}، تتوقفُ عمليةُ اختزالِ أيوناتِ MnO_4^- إلى أيوناتِ Mn^{2+} عديمةِ اللونِ. هكذا يشيرُ الظهورُ الأولُ للونِ MnO_4^- إلى نقطةِ النهايةِ للمعايرةِ.

مسألةٌ نموذجية 1-8

اكتبِ المعادلةَ الموزونةَ للتفاعلِ المبيَّنِ في الشكل 4-8. يُعايَرُ محلولٌ أرجوانيٌّ داكنٌ من بيرمنجناتِ البوتاسيوم بمحلولٍ عديمِ اللونِ من كبريتاتِ الحديدِ (II) وحمضِ الكبريتيكِ. النواتجُ هي كبريتاتُ الحديدِ (III) وكبريتاتُ المنجنيز (II)، وكبريتاتُ البوتاسيوم، والماءُ. جميعُ هذه المركَّباتِ عديمةُ اللونِ.

الحلّ

1. اكتبِ المعادلةَ بالصيغِ، ثم اكتبِ المعادلةَ الأيونيَّةَ.

$$KMnO_4 + FeSO_4 + H_2SO_4 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + MnSO_4 + K_2SO_4 + H_2O$$

$$K^+ + MnO_4^- + Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 2H^+ + SO_4^{2-} \rightarrow$$
$$2Fe^{3+} + 3SO_4^{2-} + Mn^{2+} + SO_4^{2-} + 2K^+ + SO_4^{2-} + H_2O$$

2. عيّنْ أعدادَ الأكسدةِ لكلِّ عنصرٍ وأيونٍ. احذفِ الموادَّ المحتويةَ على عنصرٍ لا يتغيَّرُ عددُ أكسدتِه.

$$\overset{+1}{K^+} + \overset{+7\ -2}{MnO_4^-} + \overset{+2}{Fe^{2+}} + \overset{+6\ -2}{SO_4^{2-}} + \overset{+1}{2H^+} + \overset{+6\ -2}{SO_4^{2-}} \rightarrow$$
$$\overset{+3}{2Fe^{3+}} + \overset{+6\ -2}{3SO_4^{2-}} + \overset{+2}{Mn^{2+}} + \overset{+6\ -2}{SO_4^{2-}} + \overset{+1}{2K^+} + \overset{+6\ -2}{SO_4^{2-}} + \overset{+1\ -2}{H_2O}$$

تُستبقى فقط الأيوناتُ والجزيئاتُ التي تتغيَّرُ أعدادُ الأكسدةِ فيها.

$$\overset{+7\ -2}{MnO_4^-} + \overset{+2}{Fe^{2+}} \rightarrow \overset{+3}{Fe^{3+}} + \overset{+2}{Mn^{2+}}$$

3. اكتبِ التفاعلَ النصفيَّ للأكسدةِ. يُظهِرُ الحديدُ زيادةً في عددِ الأكسدةِ. لذلك هو الذي يتأكسدُ.

$$\overset{+2}{Fe^{2+}} \rightarrow \overset{+3}{Fe^{3+}}$$

- زنِ الكتلةَ. الكتلةُ هي، في الواقعِ، موزونةٌ.
- زنِ الشحنةَ.

$$\overset{+2}{Fe^{2+}} \rightarrow \overset{+3}{Fe^{3+}} + e^-$$

4. اكتبِ التفاعلَ النصفيَّ للاختزالِ. يُظهِرُ المنجنيزُ تغيُّرًا في عددِ الأكسدةِ من +7 إلى +2. هو إذنْ الذي تمَّ اختزالُه.

$$\overset{+7}{MnO_4^-} \rightarrow \overset{+2}{Mn^{2+}}$$

- زنِ الكتلةَ. يجبُ إضافةُ الماءِ وأيوناتِ الهيدروجينِ لموازنةِ ذرّاتِ الأكسجينِ في أيونِ البيرمنجناتِ.

$$\overset{+7}{MnO_4^-} + 8H^+ \rightarrow \overset{+2}{Mn^{2+}} + 4H_2O$$

- زنِ الشحنةَ.

$$\overset{+7}{MnO_4^-} + 8H^+ + 5e^- \rightarrow \overset{+2}{Mn^{2+}} + 4H_2O$$

5. اضبطِ المعاملاتِ لحفظِ الشحنةِ.

$$\frac{\text{عدد } e^- \text{ المفقود في الأكسدةِ}}{\text{عدد } e^- \text{ المكتسَب في الاختزال}} = \frac{1}{5}$$

$$5(Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-)$$

$$1(MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O)$$

6. اجمعِ التفاعلَين النصفيَّين واختصرْ.

$$5Fe^{2+} \rightarrow 5Fe^{3+} + 5e^-$$
$$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightarrow Mn^{2+} + 4H_2O$$
$$MnO_4^- + 5Fe^{2+} + 8H^+ + \cancel{5e^-} \rightarrow Mn^{2+} + 5Fe^{3+} + 4H_2O + \cancel{5e^-}$$

7. اجمعِ الأيوناتِ لتكوّنَ المركَّباتِ الظاهرةَ في المعادلةِ الأصليَّةِ. يظهرُ ناتجُ الحديدِ (III) في المعادلةِ الأصليَّةِ بشكلِ $Fe_2(SO_4)_3$. كلُّ جزيءٍ من كبريتاتِ الحديدِ (III) يتطلَّبُ أيونَيْ حديدٍ (II). لذلك يجبُ ضربُ المعادلةِ في 2 لتحقيقِ عددٍ متساوٍ من أيوناتِ الحديدِ.

$$2(5Fe^{2+} + MnO_4^- + 8H^+ \rightarrow 5Fe^{3+} + Mn^{2+} + 4H_2O)$$
$$10Fe^{2+} + 2MnO_4^- + 16H^+ \rightarrow 10Fe^{3+} + 2Mn^{2+} + 8H_2O$$

في المعادلةِ الأصليَّةِ تظهرُ أيوناتُ الحديدِ (II)، والحديدِ (III)، والمنجنيز (II) وأيونا هيدروجين، مرتبطةً مع أيوناتِ الكبريتاتِ. تتطلَّبُ 10 أيوناتِ حديدٍ (II) 10 أيوناتِ كبريتاتٍ. ويتطلَّبُ $16\ H^+$ ثمانيةَ أيوناتِ كبريتاتٍ. لوزنِ المعادلةِ يجبُ إضافةُ 18 أيونَ كبريتاتٍ إلى كلِّ طرفٍ. فعلى طرفِ النواتجِ 15 من هذه الأيوناتِ تكوّنُ كبريتاتِ الحديدِ (III)، واثنانِ منها يكوّنانِ كبريتاتِ المنجنيز (II). يبقى أيونُ كبريتاتٍ ليس له تفسيرٌ. يتطلبُ أيونُ البيرمنجناتِ إضافةَ أيونينِ من البوتاسيومِ إلى كلِّ طرفٍ. هذانِ الأيونانِ من البوتاسيومِ يكوِّنانِ كبريتاتِ البوتاسيومِ في طرفِ النواتجِ للتفاعلِ.

$$10FeSO_4 + 2KMnO_4 + 8H_2SO_4 \rightarrow 5Fe_2(SO_4)_3 + 2MnSO_4 + K_2SO_4 + 8H_2O$$

المعاينةُ النهائيَّةُ تُظهرُ أن الذرّاتِ والشحناتِ موزونةٌ.

تمارينُ تطبيقية

1. يتفاعلُ النحاسُ مع حمضِ الكبريتيكِ المركّزِ والساخنِ ليكوّنَ كبريتاتِ النحاسِ (II) وثاني أكسيدِ الكبريتِ والماءِ. اكتبْ معادلةَ هذا التفاعلِ، ثمَّ زِنْها.

2. اكتبْ معادلةَ التفاعلِ بين حمضِ النيتريكِ ويوديدِ البوتاسيوم، لإنتاجِ نيتراتِ البوتاسيومِ، واليودِ، وأوّلِ أكسيدِ النيتروجينِ والماءِ. ثمَّ زِنْ هذه المعادلةَ.

الجواب

1. $Cu + 2H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + SO_2 + 2H_2O$

2. $8HNO_3 + 6KI \rightarrow 6KNO_3 + 3I_2 + 2NO + 4H_2O$

مراجعةُ القسمِ 2-8

1. ما الكمّيَّتانِ المحفوظتانِ في معادلاتِ الأكسدةِ–اختزال؟

2. لماذا نضيفُ H^+ و H_2O إلى بعضِ التفاعلاتِ النصفيَّةِ ويضافُ OH^- و H_2O إلى تفاعلاتٍ أخرى؟

3. زِنْ تفاعلَ الأكسدةِ–اختزال التالي:

$$Na_2SnO_2 + Bi(OH)_3 \rightarrow Bi + Na_2SnO_3 + H_2O$$

تفكيرٌ ناقد

4. **ربطُ أفكار:** يُنتِجُ عنصرُ الفوسفورِ P_4 عندَ تسخينِهِ الفوسفينَ PH_3 وحمضَ الفوسفوريكِ H_3PO_4. ضعْ خطَّةً لوزنِ هذه المعادلةِ.

القسم 3-8

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يربطُ النشاطيَّةَ الكيميائيَّةَ بقوَّةِ العاملِ المؤكسِدِ والعاملِ المختزِلِ.
- يفسِّرُ مفهومَ عدمِ التناسبِ.

العواملُ المؤكسدةُ والعواملُ المختزلةُ

العاملُ المختزِلُ reducing agent ***مادّةٌ لها القدرةُ على اختزالِ مادّةٍ أخرى.*** والعاملُ المختزِلُ يفقدُ إلكتروناتٍ، ويزدادُ عددُ أكسدتِه خلالَ تفاعلِ أكسدةٍ-اختزالٍ. لذلك يكونُ العاملُ المختزِلُ المادَّةَ التي تتأكسدُ.

العاملُ المؤكسِدُ oxidizing agent ***مادّةٌ لها القدرةُ على أكسدةِ مادّةٍ أخرى.*** العاملُ المؤكسِدُ يكسبُ إلكتروناتٍ ويقلُّ عددُ أكسدتِهِ خلالَ تفاعلِ أكسدةٍ-اختزالٍ. العاملُ المؤكسِدُ هو المادَّةُ التي يتمُّ اختزالُها. يساعدُ الجدولُ 8-2 على توضيحِ المصطلحاتِ التي تصفُ عمليَّةَ الأكسدةِ-اختزالٍ.

قوةُ العواملِ المُؤكسِدةِ والمُختزِلةِ

يمكنُ مقارنةُ موادَّ مختلفةٍ من حيثُ قدرتُها النسبيَّةُ كعواملَ مُختزلةٍ ومُؤكسِدةٍ. مثلاً، يرتبطُ ترتيبُ العناصرِ في سلسلةِ النشاطيَّةِ (راجعِ الجدول 2-3 فصلَ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ، الصفّ الحادي عشر) بميلِ كلِّ عنصرٍ إلى فقدِ إلكتروناتٍ. في هذه السلسلةِ تفقدُ العناصرُ إلكتروناتٍ لصالحِ الأيوناتِ الموجبةِ لأيِّ عنصرٍ يُوجدُ تحتَها في السلسلةِ. وبقدرِ ما يكونُ العنصرُ أكثرَ نشاطًا، يكونُ ميلُهُ أكبرَ إلى فقدِ إلكتروناتٍ، ويكونُ عاملاً مُختزِلاً أقوى. وبقدرِ ما تكونُ المسافةُ أكبرَ بينَ عنصرينِ في السلسلةِ، يكونُ أكبرَ احتمالُ أن يحدثَ تفاعلٌ بينَهما.

هذه العناصرُ، وكذلك بعضُ الموادِّ الشائعةِ، مرتبةٌ في الجدولِ 8-3 تبعًا لنشاطيَّتِها كعواملَ مؤكسِدةٍ ومختزِلةٍ. إن ذرَّةَ الفلورِ هي الذرَّةُ ذاتُ السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ الأعلى، وهي أيضًا العاملُ المؤكسِدُ الأكثرُ نشاطيَّةً. كما أن أيونَ الفلوريدِ، بسببِ جذبِه القويِّ لإلكتروناتِهِ الخاصَّةِ يكونُ العاملَ المختزِلَ الأضعفَ. الأيونُ السالبُ لعاملٍ مؤكسِدٍ قويٍّ هو عاملٌ مختزِلٌ ضعيفٌ.

الجدول 8-2 مصطلحاتُ الأكسدةِ-اختزالٍ

المصطلح	التغيرُ في عددِ الأكسدةِ	التغيرُ في عددِ الإلكترونات
الأكسدة	يزداد	فقدُ إلكتروناتٍ
الاختزال	يقلّ	كسبُ إلكتروناتٍ
عاملٌ مؤكسِدٌ	يقلّ	كسبُ إلكتروناتٍ
عاملٌ مختزِلٌ	يزداد	فقدُ إلكتروناتٍ

والأيونُ الموجبُ لعاملٍ مختزلٍ قويٍّ هو عاملٌ مؤكسِدٌ ضعيفٌ. ذرّاتُ الليثيوم كما هو مُبيَّنٌ في الجدول 8-3 عواملُ مختزلةٌ قويَّةٌ لأن الليثيومَ فِلِزٌّ نشطٌ جدًّا. عندما تتأكسدُ ذرّاتُ الليثيوم تُنتِجُ الأيوناتِ Li^{+} التي تُعدُّ عواملَ مؤكسِدةً ضعيفةً.

العمودُ الأيسرُ لكلِّ زوجٍ يبيِّنُ أيضًا القدراتِ النسبيّةَ للفِلِزّاتِ المبيَّنةِ في الجدول 8-3 على أن تحلَّ محلَّ فلزّاتٍ أخرى في مركَّباتِها. فالخارصينُ، مثلاً، يسبقُ النحاسَ. لذلك يكونُ الخارصينُ العاملَ المختزلَ الأكثرَ نشاطيَّةً، ويحلُّ محلَّ أيوناتِ النحاس في المحاليل التي تحتوي على مركَّباتِ النحاسِ، كما يظهرُ في الشكل 8-5. أيونُ النحاسِ (II)، في المقابل، هو العاملُ المؤكسِدُ الأكثرُ نشاطيَّةً من أيون الخارصين.

اللافِلِزّاتُ وبعضُ الأيوناتِ المهمَّةِ هي أيضًا موجودةٌ في الجدول 8-3. أيُّ عاملٍ مختزلٍ يتأكسدُ بالعواملِ المؤكسِدةِ الموجودةِ تحته. لاحظْ أن F_2 يحلُّ محلَّ الأيوناتِ Cl^{-} و Br^{-} و I^{-} في محاليلِها. Cl_2 يحلُّ محلَّ الأيوناتِ Br^{-} و I^{-}، و Br_2 يحلُّ محلَّ الأيوناتِ I^{-}.

وفيما يلي معادلةُ إحلالِ Cl_2 محلَّ Br^{-}:

$$Cl_2 + 2Br^{-}(aq) \rightarrow 2Cl^{-}(aq) + Br_2$$

$$(\text{أكسدة}) \quad 2\overset{-1}{Br^{-}} \rightarrow \overset{0}{Br_2} + 2e^{-}$$

$$(\text{اختزال}) \quad \overset{0}{Cl_2} + 2e^{-} \rightarrow 2\overset{-1}{Cl^{-}}$$

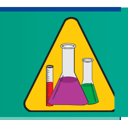
في تفاعلِ أكسدةٍ–اختزالٍ يوجدُ عاملٌ مختزِلٌ وعاملٌ مؤكسِدٌ. في المثالِ السابقِ، Br^{-} هو العاملُ المختزِلُ، و Cl_2 هو العاملُ المؤكسِدُ.

الجدول 8-3 القوةُ النسبيَّةُ للعواملِ المؤكسِدةِ والمختزلةِ

العواملُ المؤكسِدة	العواملُ المختزِلة
Li^{+}	Li
K^{+}	K
Ca^{2+}	Ca
Na^{+}	Na
Mg^{2+}	Mg
Al^{3+}	Al
Zn^{2+}	Zn
Cr^{3+}	Cr
Fe^{2+}	Fe
Ni^{2+}	Ni
Sn^{2+}	Sn
Pb^{2+}	Pb
H_3O^{+}	H_2
S	H_2S
Cu^{2+}	Cu
I_2	I^{-}
MnO_4^{-}	MnO_4^{2-}
Fe^{3+}	Fe^{2+}
Hg_2^{2+}	Hg
Ag^{+}	Ag
NO_3^{-}	NO_2^{-}
Br_2	Br^{-}
MnO_2	Mn^{2+}
H_2SO_4 (مركَّز)	SO_2
$Cr_2O_7^{2-}$	Cr^{3+}
Cl_2	Cl^{-}
MnO_4^{-}	Mn^{2+}
F_2	F^{-}

ازديادُ القوة $\downarrow$ — ازديادُ القوة $\uparrow$

الشكل 8-5 يحلُّ الخارصينُ محلَّ أيوناتِ النحاسِ في محلولِ كبريتاتِ النحاسِ (II)، بينما يترسَّبُ فلزُّ النحاسِ.



نشاط عملي سريع

تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالِ

ضعِ النظارةَ الواقيةَ والمريولَ

المواد

- رقاقةُ ألمنيوم
- كأسٌ زجاجيَّةٌ، 250 mL
- محلولُ كلوريدِ النحاسِ (II)، $1\ M\ CuCl_2$
- بيروكسيدُ الهيدروجينِ 3%
- ثاني أكسيدِ المنجنيزِ
- مسطرةٌ متريَّةٌ
- مقصّ
- ماسكُ أنبوبِ اختبارٍ
- أنبوبُ اختبارٍ، 1 × 150 mm
- شريحةٌ خشبيَّةٌ رقيقةٌ

الطريقة

سجِّلْ جميعَ نتائجِكَ في جدولِ بياناتٍ.

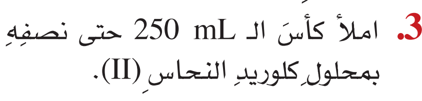
1. ضعْ 10 mL من بيروكسيدِ الهيدروجينِ في أنبوبِ اختبارٍ، وأضفْ كمّيَّةً قليلةً من ثاني أكسيدِ المنجنيزِ (مساويةً لحجمِ نصفِ حبةِ حمَّصٍ تقريبًا) ما النتيجةُ؟
2. أدخِلْ شريحةً خشبيَّةً مشتعلةً في أنبوبِ الاختبارِ (انظرِ الرسمَ المجاورَ) ما النتيجةُ؟ إذا نَتَجَ الأكسجينُ فإن الشريحةَ الخشبيَّةَ المشتعلةَ في أنبوبِ الاختبارِ ستزدادُ توهُّجًا.
3. املأْ كأسَ الـ 250 mL حتى نصفِهِ بمحلولِ كلوريدِ النحاسِ (II).
4. اقطعْ رقاقةَ الألمنيومِ إلى أشرطةٍ 2 cm × 12 cm.
5. أضِفْ أشرطةَ الألمنيومِ إلى محلولِ كلوريدِ النحاسِ (II). استخدمْ ساقًا زجاجيَّةً لتحريكِ الخليطِ، ولاحظْ لمدةِ 12-15 دقيقة. ما النتيجةُ؟

المناقشة

1. اكتبْ معادلاتٍ موزونةً تبيِّنُ ما حدثَ في كلٍّ من التفاعلَين.
2. اكتبِ استنتاجًا للتجربتَين.

عدمُ التناسبِ

بعضُ الموادِّ يمكنُها أن تُؤكسَدَ وتُختزَلَ بسهولةٍ. منها، مثلاً، أيوناتُ البيروكسيدِ، O_2^{2-}، فهي تتميَّزُ برابطةٍ تساهميَّةٍ غيرِ مستقرَّةٍ بين ذرَّتَيِ الأكسجينِ. وصيغةُ الترميزِ النقطيِّ للإلكترون تكتبُ كما يلي:



$$[:\ddot{O}:\ddot{O}:]^{2-}$$

كلُّ ذرَّةِ أكسجينٍ لها عددُ أكسدةٍ 1−. وتركيبُ أيونِ البيروكسيدِ يمثِّلُ حالةَ أكسدةٍ وسطيَّةٍ بين O_2 و O^{2-}. لذلك يتَّصفُ أيونُ البيروكسيدِ بدرجةِ نشاطيَّةٍ عاليةٍ.

وبيروكسيدُ الهيدروجينِ، H_2O_2، يحتوي على أيونِ البيروكسيدِ النشطِ. فهو يتفكَّكُ إلى ماءٍ وأكسجينٍ جزيئيٍّ، كما يظهرُ في هذه المعادلةِ:

$$2H_2\overset{-1}{O_2} \rightarrow 2H_2\overset{-2}{O} + \overset{0}{O_2}$$

الشكل 8-6 تستطيعُ الخنفساءُ أن تصدَّ كائناتٍ مفترسةً كبيرةً كالضفادعِ، وذلك بآليَّةِ دفاعٍ كيميائيَّةٍ تقومُ على تفاعلِ عدمِ التناسبِ لبيروكسيدِ الهيدروجين.

وجديرٌ بالملاحظةِ أن بيروكسيدَ الهيدروجين في هذا التفاعل يتأكسدُ ويُختزَلُ. فذرّاتُ الأكسجينِ التي تصبحُ جزءًا من جزيئاتِ الأكسجينِ الغازيةِ، تأكسدَت. وعددُ الأكسدةِ لهذه الذرّاتِ من الأكسجينِ يزدادُ من 1– إلى 0. وذرّاتُ الأكسجينِ التي تصبحُ جزءًا من الماءِ اختُزلت. كما أن عددَ الأكسدةِ لهذه الذرّاتِ من الأكسجينِ ينخفضُ من 1– إلى 2–. ***هذه العمليَّةُ التي تعملُ خلالَها مادّةٌ معيَّنةٌ كعاملٍ مؤكسِدٍ وكعاملٍ مختزلٍ تُسمَّى عدمَ التناسبِ*** **disproportionation**. والمادَّةُ التي تخضعُ لتفاعلِ عدمِ التناسبِ تقومُ بدورِ العاملِ المؤكسدِ والعاملِ المختزلِ في الوقتِ نفسهِ. (أي إنها مؤكسدٌ ذاتيٌّ ومختزلٌ ذاتيٌّ)

الخنفساءُ القاذفةُ (bombardier beetle) تدافعُ عن نفسِها برشِّ أعدائِها بخليطٍ كيميائيٍّ ساخنٍ وكريهِ الرائحةِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكل 8-6. تفاعلُ عدمِ التناسبِ المُحفَّزُ لبيروكسيدِ الهيدروجينِ يُنتجُ غازَ الأكسجينِ الساخنَ. هذا الغازُ يُعطي للحشرةِ القدرةَ على قذفِ موادَّ كيميائيَّةٍ مهيِّجةٍ من جوفِها بقوةٍ كبيرةٍ.

مراجعةُ القسم 8-3

1. صفِ النشاطيَّةَ الكيميائيَّةَ للفلزّاتِ القلويَّةِ وللهالوجيناتِ على أساسِ قوَّتها، كعواملَ مؤكسدةٍ وعواملَ مختزلةٍ.

2. تُظهِرُ الصورةُ تفاعلَيْ أكسدةٍ–اختزالٍ. المسماران كلاهما موجودان في محلولِ حمضِ الكبريتيكِ. أجبْ عن الأسئلةِ التاليةِ:

أ. عندما يُلفُّ الخارصينُ حولَ مسمارِ الحديدِ، ما الذي يتأكسدُ: الحديدُ أم الخارصينُ؟

ب. عندما يُلَفُّ النحاسُ حولَ مسمارِ الحديدِ، ما الذي يتأكسدُ: الحديدُ أم النحاسُ؟

3. هل يُختزَلُ الـ Cl_2 بـ I^-؟ فسِّرْ إجابتَك.

4. ما العاملُ المؤكسِدُ الأقوى في كلٍّ من الأزواجِ التاليةِ: Cu^{2+} أو Al^{3+}، I_2 أو S، F_2 أو Li^+؟

5. ما المقصودُ بعدمِ التناسبِ؟

تفكيرٌ ناقد

6. **تنظيمُ أفكار:** بشكلٍ عامٍّ، أين تقعُ العواملُ المؤكسِدةُ الأقوى في الجدولِ الدوريِّ؟ فسِّرْ إجابتَك.

مراجعةُ الفصل 8

ملخّصُ الفصل

1-8

- يتمُّ تعيينُ أعدادِ الأكسدةِ بمجموعةٍ من القواعدِ مبيَّنةٍ في الجدول 8-1. تستندُ أعدادُ الأكسدةِ إلى توزيعِ الإلكتروناتِ في الجزيءِ.
- تتألّفُ تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالٍ من تفاعلَينِ نصفيَّينِ يجبُ أن يحدثا بشكلٍ متزامن.
- تحدَّدُ هويَّةُ تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ بفحصِ التغيُّراتِ في أعدادِ الأكسدةِ التابعةِ لذرّاتِ المتفاعلاتِ والنواتجِ.
- تتضمَّنُ عمليَّةُ الأكسدةِ فقدَ إلكتروناتٍ، وتتضمَّنُ عمليَّةُ الاختزالِ كسبَ إلكتروناتٍ.
- النوعُ الذي يزيدُ فيه عددُ الأكسدةِ هو الذي يتأكسدُ. والنوعُ الذي ينخفضُ فيه عددُ الأكسدةِ هو الذي يحدثُ له الاختزالُ.

المفردات

- الأكسدةُ oxidation (216)
- الاختزالُ reduction (217)
- تفاعلُ الأكسدةِ-اختزالٍ oxidation-reduction reaction (217)
- التفاعلُ النصفيُّ half-reaction (217)

2-8

- في معادلةِ تفاعلِ الأكسدةِ-اختزالٍ تُحفَظُ الكتلةُ والشحنةُ.
- في تطبيقِ طريقةِ التفاعلِ النصفيِّ لوزنِ معادلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ، يتمُّ وزنُ الذرّاتِ والشحنةِ لمعادلتَي الأكسدةِ والاختزالِ بشكلٍ منفصلٍ، ثم تُجمَعُ المعادلتان لتعطيا المعادلةَ الموزونةَ التامَّةَ.
- في التفاعلِ النصفيِّ، يجبُ أن تتساوى شحنةُ طرفِ المتفاعلاتِ مع شحنةِ طرفِ النواتجِ. وهذه الشحناتُ ليسَ ضروريًّا أن تساويَ صفرًا.
- في تطبيقِ طريقةِ التفاعلِ النصفيِّ يتمُّ وزنُ ذرّاتِ كلِّ تفاعلٍ نصفيٍّ بإضافةِ أيوناتِ H^+ وجزيئاتِ H_2O في المحاليلِ الحمضيَّةِ. وإذا كان المحلولُ قاعديًّا تُضافُ إليه أيوناتُ OH^- وجزيئاتُ H_2O لوزنِ الذرّاتِ في كلِّ تفاعلٍ نصفيٍّ.
- عددُ الإلكتروناتِ المفقودةِ في التفاعلِ النصفيِّ للأكسدةِ يجبُ أن يساويَ عددَ الإلكتروناتِ المكتسبةِ في التفاعلِ النصفيِّ للاختزالِ. يجبُ ضربُ التفاعلَينِ النصفيَّينِ في المُعاملاتِ المناسبةِ للتأكدِ من تَساوي عددِ الإلكتروناتِ عندَ جمعِ التفاعلَيْنِ النصفيَّيْنِ.

3-8

- المادَّةُ التي تُختزَلُ في تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ هي العاملُ المؤكسِدُ لأنه يكسبُ إلكتروناتٍ من المادةِ التي تأكسدَتْ.
- المادَّةُ التي تتأكسدُ في تفاعلِ أكسدةٍ-اختزالٍ هي العاملُ المُختزِلُ لأنه يزوِّدُ المادَّةَ التي حدثَ لها الاختزالُ بالإلكتروناتِ.
- العواملُ المختزِلةُ القويَّةُ هي موادُّ تمنحُ إلكتروناتٍ بسهولةٍ.
- عدمُ التناسبِ تفاعلٌ تكونُ فيها مادَّةٌ معيَّنةٌ عاملاً مؤكسِدًا وعاملاً مختزِلاً.

المفردات

- العاملُ المختزِلُ reducing agent (226)
- العاملُ المؤكسِدُ oxidizing agent (226)
- عدمُ التناسبِ disproportionation (229)

اختيارٌ من متعدِّد

1. في التفاعلِ التالي، $2K + Br_2 \rightarrow 2K^+ + 2Br^-$، أيٌّ مما يلي تمَّ اختزالُه؟
أ. K ج. Br^-
ب. Br_2 د. لا شيءَ مما تقدَّمَ

2. عددُ الأكسدةِ لذرَّةِ الكبريتِ في الأيون SO_4^{2-} هو
أ. $+2$ ج. $+6$
ب. -2 د. $+4$

3. التفاعلُ النصفيُّ
أ. يتضمَّنُ تغيُّرَ عددِ الأكسدةِ لعنصرٍ معيَّنٍ.
ب. يحتوي دائمًا على جزيئاتِ H_2O.
ج. يحتوي دائمًا على أيوناتِ H^+.
د. جميعُ ما سبقَ.

4. العاملُ المؤكسِدُ في التفاعلِ التالي
$AgNO_2 + Cl_2 + 2KOH \rightarrow AgNO_3 + 2KCl + 2H_2O$
أ. $AgNO_2$ ج. KOH
ب. Cl_2 د. KCl

5. ما حالاتُ الأكسدةِ للعنصرِ الذي يخضعُ لعدمِ التناسبِ في التفاعلِ التالي؟
$Cl_2 + H_2O \rightarrow HCl + HOCl$
أ. -1، 0، $+2$ ج. -2، -1، 0
ب. -1، 0، $+1$ د. لا شيءَ مما تقدَّمَ

6. أيُّ تفاعلٍ هو تفاعلُ أكسدةٍ-اختزالٍ؟
أ. $Al_2O_3 + 6HCl \rightarrow 2AlCl_3 + 3H_2O$
ب. $2HCO_3^- \rightarrow CO_2 + CO_3^{-2} + H_2O$
ج. $SiBr_4 + 3H_2O \rightarrow H_2SiO_3 + 4HBr$
د. $H_2O + PbO_2 + NaOH + KCl \rightarrow KClO + NaPb(OH)_3$

7. الترتيبُ التصاعديُّ لعددِ أكسدةِ الكبريتِ في كلٍّ من $S_2O_3^{2-}$، $S_4O_6^{2-}$، HSO_4^-، H_2S، هو:
أ. H_2S، $S_2O_3^{2-}$، $S_4O_6^{2-}$، HSO_4^-
ب. $S_2O_3^{2-}$، H_2S، $S_4O_6^{2-}$، HSO_4^-
ج. H_2S، $S_2O_3^{2-}$، HSO_4^-، $S_4O_6^{2-}$
د. HSO_4^-، $S_2O_3^{2-}$، $S_4O_6^{2-}$، H_2S

8. $2Pb(NO_3)_2 \rightarrow 2PbO + 4NO_2 + O_2$
المعادلةُ السابقةُ تمثِّلُ تفاعلَ
أ. تفكُّكٍ وليس تفاعلَ أكسدةٍ-اختزالٍ.
ب. أكسدةٍ-اختزالٍ يُختزَلُ فيه الرصاصُ ويتأكسدُ الأكسجينُ.
ج. عدمِ تناسبٍ.
د. أكسدةٍ-اختزالٍ يُختزَلُ فيه النيتروجينُ ويتأكسدُ الأكسجينُ.

مراجعةُ المفاهيم

9. أ. ميِّزْ بين عمليّاتِ الأكسدةِ والاختزالِ.
ب. اكتبْ معادلةً توضحُ كلَّ عمليَّةٍ.

10. أيٌّ من التفاعلاتِ التاليةِ هي تفاعلاتُ أكسدةٍ-اختزالٍ؟
أ. $2Na + Cl_2 \rightarrow 2NaCl$
ب. $C + O_2 \rightarrow CO_2$
ج. $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$
د. $NaCl + AgNO_3 \rightarrow AgCl + NaNO_3$
هـ. $NH_3 + HCl \rightarrow NH_4^+ + Cl^-$
و. $2KClO_3 \rightarrow 2KCl + 3O_2$
ز. $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$
ح. $H_2SO_4 + 2KOH \rightarrow K_2SO_4 + 2H_2O$
ط. $Zn + CuSO_4 \rightarrow ZnSO_4 + Cu$

11. حدِّدْ في تفاعلاتِ السؤالِ السابقِ، النوعَ الذي حدثَتْ له الأكسدةُ، والنوعَ الذي حدثَ له الاختزالُ.

12. صنِّفِ التفاعلاتِ النصفيَّةَ التاليةَ إلى تفاعلاتٍ نصفيَّةٍ للأكسدةِ أو تفاعلاتٍ نصفيَّةٍ للاختزالِ.
أ. $H_2S \rightarrow S + 2e^- + 2H^+$
ب. $SO_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow S + 4OH^-$
ج. $ClO_3^- + 6H^+ + 6e^- \rightarrow Cl^- + 3H_2O$
د. $[Mn(CN)_6]^{4-} \rightarrow [Mn(CN)_6]^{3-} + e^-$

13. في التفاعلاتِ النصفيَّةِ الواردةِ في السؤالِ السابقِ، حدِّدِ العناصرَ التي حدثَ لها تغيُّرٌ في عددِ الأكسدةِ، وحدِّدْ قيمَ هذا التغيُّرِ.

14. زِنْ معادلةَ التفاعلِ التالي في محلولٍ قاعديٍّ. اكتبْ معادلاتٍ موزونةً لكلا التفاعلَينِ النصفيَّين، وكذلك المعادلةَ الموزونةَ للتفاعلِ النهائيِّ.
$KMnO_4 + NaIO_3 \rightarrow MnO_2 + NaIO_4$

15. أ. حدِّدْ هويَّةَ العاملِ المختزلِ الأكثرِ نشاطيَّةً من بينِ جميعِ العناصرِ الشائعةِ.
ب. لماذا تكونُ جميعُ العناصرِ التابعةِ لمجموعةِ هذا العنصرِ في الجدولِ الدوريِّ عواملَ مختزلةً عاليةَ النشاطيَّةِ.
ج. حدِّدْ هويَّةَ العاملِ المؤكسِدِ الأكثرِ نشاطيَّةً من بَينِ جميعِ العناصرِ الشائعةِ.

16. استخدمِ الجدولَ 8-3 لتحديدِ هويَّةِ العاملِ المختزلِ الأقوى والعاملِ المختزلِ الأضعفِ من بينِ الموادِّ المدرجةِ داخلَ كلٍّ من المجموعاتِ التاليةِ:
أ. Cl^-، Sn، Ag، Ca
ب. Br^-، Al، Hg، Fe
ج. Na، Mn^{2+}، Pb، F^-

17. استخدمِ الجدولَ 8-3 للإجابةِ عمّا يلي:
أ. هل يتأكسدُ Al بـ Ni^{2+}؟
ب. هل يتأكسدُ Cu بـ Ag^+؟
ج. هل يتأكسدُ Pb بـ Na^+؟
د. هل يُختزلُ F_2 بـ Cl^-؟
هـ. هل يُختزلُ Br_2 بـ Cl^-؟

مسائل

18. يخضعُ كلٌّ من أزواجِ الذرَّةِ/الأيونِ التاليةِ لتغيُّرٍ في عددِ الأكسدةِ. حدِّدْ، لكلِّ زوجٍ، ما إذا حدثَتْ أكسدةٌ أم اختزالٌ، ثم اكتبِ التفاعلَ النصفيَّ الذي يشيرُ إلى عددِ الإلكتروناتِ المفقودةِ أو المكتسبةِ.
أ. $K \rightarrow K^+$
ب. $S \rightarrow S^{2-}$
ج. $Mg \rightarrow Mg^{2+}$
د. $F^- \rightarrow F_2$
هـ. $H_2 \rightarrow H^+$
و. $O_2 \rightarrow O^{2-}$
ز. $Fe^{3+} \rightarrow Fe^{2+}$
ح. $Mn^{2+} \rightarrow MnO_4^-$

19. صنِّفِ التفاعلاتِ التاليةَ إلى تفاعلاتِ أكسدةٍ-اختزالٍ أو تفاعلاتٍ ليسَتْ أكسدةً-اختزالٍ:
أ. $2NH_4Cl(aq) + Ca(OH)_2(aq) \rightarrow 2NH_3(aq) + 2H_2O(l) + CaCl_2(aq)$
ب. $2HNO_3(aq) + 3H_2S(g) \rightarrow 2NO(g) + 4H_2O(l) + 3S(s)$
ج. $[Be(H_2O)_4]^{2+}(aq) + H_2O(l) \rightarrow H_3O^+(aq) + [Be(H_2O)_3OH]^+(aq)$
د. $Mg(s) + ZnCl_2(aq) \rightarrow Zn(s) + MgCl_2(aq)$
هـ. $2H_2(g) + OF_2(g) \rightarrow H_2O(g) + 2HF(g)$
و. $2KI(aq) + Pb(NO_3)_2(aq) \rightarrow PbI_2(s) + 2KNO_3(aq)$
ز. $CaO(s) + H_2O(l) \rightarrow Ca(OH)_2(aq)$
ح. $3CuCl_2(aq) + 2(NH_4)_3PO_4(aq) \rightarrow 6NH_4Cl(aq) + Cu_3(PO_4)_2(s)$
ط. $CH_4(g) + 2O_2(g) \rightarrow CO_2(g) + 2H_2O(g)$

20. رتِّبِ الموادَّ التاليةَ تبعًا لزيادةِ عددِ الأكسدةِ لذرَّةِ الزينون: $CsXeF_8$، XeF_2، Xe، $XeOF_2$، XeO_3، XeF.

21. حدِّدْ عددَ الأكسدةِ لكلِّ ذرَّةٍ في الموادِّ التاليةِ:
أ. H_2
ب. H_2O
ج. Al
د. MgO
هـ. Al_2S_3
و. HNO_3
ز. H_2SO_4
ح. $Ca(OH)_2$
ط. $Fe(NO_3)_2$
ي. O_2

22. استخدمْ طريقةَ التفاعلِ النصفيِّ لوزنِ معادلةِ الأكسدةِ والاختزالِ الظاهرةِ أدناه. (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 8-1)
$$K + H_2O \rightarrow KOH + H_2$$

23. استخدمْ طريقةَ المسألةِ السابقةِ لوزنِ كلٍّ من التفاعلَين التاليَّين:
أ. $HI + HNO_2 \rightarrow NO + I_2 + H_2O$
ب. $FeCl_3 + H_2S \rightarrow FeCl_2 + HCl + S$

24. زِنْ معادلةَ تفاعلِ حمضِ الكبريتيكِ المركزِ الساخنِ مع الخارصينِ لتكوينِ كبريتاتِ الخارصينِ وكبريتيدِ الهيدروجينِ والماءِ.

مراجعةٌ متنوعة

25. رتِّبِ الموادَّ التاليةَ تنازليًّا تبعًا لعددِ الأكسدةِ لذرَّةِ النيتروجين:
N_2، NH_3، N_2O_4، N_2O، N_2H_4، NO_3^-

26. زِنْ معادلتَي الأكسدةِ-اختزالِ التاليتين:
أ. $SbCl_5 + KI \rightarrow KCl + I_2 + SbCl_3$
ب. $Ca(OH)_2 + NaOH + ClO_2 + C \rightarrow NaClO_2 + CaCO_3 + H_2O$

27. زن المعادلاتِ التالية في محلولٍ قاعديٍّ:

أ. $PbO_2 + KCl \rightarrow KClO + KPb(OH)_3$

ب. $KMnO_4 + KIO_3 \rightarrow MnO_2 + KIO_4$

ج. $K_2MnO_4 \rightarrow MnO_2 + KMnO_4$

28. زن المعادلاتِ التالية في محلولٍ حمضيٍّ:

أ. $MnO_4^- + Cl^- \rightarrow Mn^{2+} + HClO$

ب. $NO_3^- + I_2 \rightarrow IO_3^- + NO_2$

ج. $NO_2^- \rightarrow NO + NO_3^-$

تفكيرٌ ناقد

29. **تفسيرُ مخططاتٍ بيانيَّة:** المُعطى هو جدولُ النشاطيَّةِ في الأسفل، حدِّدْ ما إذا كان سيحدثُ تفاعلٌ أم لا. في حالةِ حدوثِ تفاعلٍ أعطِ النواتجَ.

عواملُ مختزلة ↑	عواملُ مؤكسِدةٌ ↓
L	L^+
M	M^+
P	P^+
T	T^+

أ. L و M^+

ب. P و M^+

ج. P و T^+

30. **استخلاصُ استنتاجات:** تحتوي مادَّةٌ على عنصرٍ في أعلى حالاتِ الأكسدةِ الممكنة. هل احتمالُ أن تكونَ هذه المادةُ عاملاً مؤكسِدًا هو أكبرُ أم أقلُّ من احتمالِ أن تكونَ عاملاً مختزلاً؟ فسِّرْ إجابتك.

31. **استخلاصُ استنتاجات:** استخدمِ الجدولَ 8-3 لتقرِّرَ ما إذا كانَ سيحصلُ تفاعلُ أكسدةٍ-اختزالٍ بينَ كلٍّ من النوعَين اللاحقَين في (أ) و (ب). وفي حالِ حدوثِ تفاعلٍ، اكتُبْ معادلتَهُ الموزونة. فسِّر إجابتك.

أ. Br_2 و Cl_2

ب. Zn و Sn^{2+}

32. **استخلاصُ استنتاجات:** كم حالةً، على الأقلِّ، من حالاتِ الأكسدةِ المختلفةِ يجبُ أن تتوفَّرَ لعنصرٍ يخضعُ لتفاعلِ عدمِ التناسبِ؟

بحثٌ وكتابة

33. تستخدمُ العواملُ المؤكسِدةُ في صناعةِ المنظِّفات. أجرِ بحثًا حولَ ثلاثةِ عواملَ مؤكسِدةٍ تُستخدَمُ في هذا المجال، واكتبْ تقريرًا عن فوائدِ هذه المركَّباتِ وأضرارِها.

34. تلعبُ العواملُ المؤكسِدةُ والمختزِلةُ دورًا مهمًّا في الأنظمةِ البيولوجيَّةِ. أجرِ بحثًا حول دورِ واحدٍ من هذه العوامل في عمليَّةٍ بيولوجيَّةٍ. اكتبْ تقريرًا يصفُ هذه العمليَّةَ ودورَ الأكسدةِ والاختزال.

تقويمٌ بديل

35. تُستخدمُ المراجلُ لتحويل الماءِ إلى بخارٍ في محطّاتِ توليدِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ. يُحفِّزُ الأكسجينُ الذائبُ في الماءِ تآكلَ الفولاذِ المستخدمِ في أجزاءِ المرجل. وضِّحْ كيفَ تتمُّ إزالةُ الأكسجينِ الذائبِ من الماءِ في المراجل.

36. **أداء:** سجِّلْ، ليومٍ واحدٍ، الحالاتِ التي تُظهرُ أدلَّةً على تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ. حدِّدْ هويَّةَ المتفاعلاتِ والنواتجِ، وقدِّرْ: هل يوجدُ برهانٌ على حدوثِ تفاعلٍ كيميائيٍّ؟

مشروعٌ علميٌّ

37. استخلاصُ حمضِ الأسكوربيك (المضادِّ للأكسدةِ) وتوظيفُه كمادَّةٍ حافظةٍ للأغذيةِ، ثم استقصاءُ الظروفِ الأنسبِ لتوظيفِه كمادَّةٍ مانعةٍ للأكسدةِ.

الفصـــل 9

الكيمياءُ الكهربائيَّةُ

تفاعلاتُ الكيمياءِ الكهربائيَّةِ توفِّرُ الطاقةَ لجميعِ أنواعِ التطبيقاتِ

القسم 9-1

مدخلٌ إلى الكيمياءِ الكهربائيَّةِ

مؤشِّراتُ الأداءِ

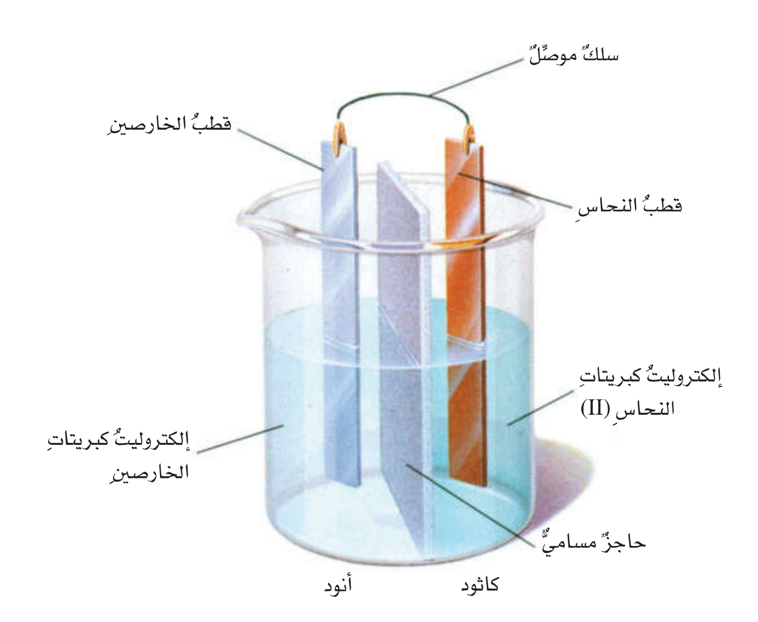
- يحدِّدُ أجزاءَ الخليَّةِ الكهروكيميائيَّةِ ووظائفَها.
- يكتبُ التفاعلاتِ النصفيَّةَ الحادثةَ عند كلٍّ من الأنودِ والكاثودِ.

تتضمّنُ تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالِ تغيُّراتٍ في الطاقةِ. وبما أن هذه التفاعلاتِ تتضمّنُ انتقالَ إلكتروناتٍ، فإن التغيُّرَ في الطاقةِ، يمكنُ أن يظهرَ بصورةِ طاقةٍ كهربائيَّةٍ، بدلاً عن الحرارةِ. هذه الخاصَّةُ تسمحُ بالكثيرِ من التطبيقاتِ العمليَّةِ لتفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالِ. ***فرعُ الكيمياءِ، الذي يتعاملُ مع تطبيقاتِ تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالِ المرتبطةِ بالكهرباءِ، يُسمَّى الكيمياءَ الكهربائيَّةَ*** **electrochemistry**.

الخلايا الكهروكيميائيَّةُ

تتضمّنُ تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالِ انتقالَ إلكتروناتٍ. إذا كانتِ المادّتان متّصلتَيْن، فإن انتقالاً للطاقةِ على صورةِ حرارةٍ يصاحبُ انتقالَ الإلكترون. في الشكلِ 9-1 لوحٌ من الخارصين مغموسٌ في محلولِ كبريتاتِ النحاسِ (II). يفقدُ الخارصينُ إلكتروناتٍ لصالحِ أيوناتِ النحاسِ (II) في المحلولِ. تستقبلُ أيوناتُ النحاسِ (II) هذه الإلكترونات، ويترسّبُ من المحلولِ على شكلِ ذرّاتِ نحاسٍ. عندما تنتقلُ الإلكتروناتُ من ذرّاتِ الخارصينِ إلى أيوناتِ النحاسِ (II)، تُطلقُ كمّيَّةٌ من الطاقةِ على صورةِ حرارةٍ، كما يشيرُ إلى ذلك ارتفاعُ درجةِ الحرارةِ.

الشكل 9-1 عندما تنتقلُ إلكتروناتٌ انتقالاً مباشرًا من ذرّاتِ Zn إلى أيوناتِ Cu^{2+}، تُطلقُ كمّيَّةٌ من الطاقةِ على صورةِ حرارةٍ، مما يسبِّبُ ارتفاعًا في درجةِ حرارةِ محلولِ $CuSO_4$.



الشكل 9-2 تتكوَّنُ الخليَّةُ الكهروكيميائيَّةُ من قطبَين، كلٌّ منهما على تماسٍ مع إلكتروليت. القطبُ والإلكتروليتُ يكوِّنان نصفَ خليَّةٍ. يصلُ بين القطبَيْن سلكٌ، ويفصلُ بين الإلكتروليتَيْن حاجزٌ مساميٌّ.

لكن، إذا فصلْنا المادَّةَ التي تتأكسدُ عن المادَّةِ التي تُختزلُ، يصاحبُ انتقالَ الإلكترونِ طاقةٌ كهربائيَّةٌ بدلَ الطاقةِ على صورةِ حرارةٍ. إحدى وسائلِ الفصلِ بين التفاعلَين النصفيَّيْن: (الأكسدةِ والاختزال)، حاجزٌ مساميٌّ أو قنطرةٌ ملحيَّةٌ. يمنعُ هذا الحاجزُ ذرّاتِ فلزِّ التفاعلِ النصفيِّ من الاختلاطِ مع أيوناتِ التفاعلِ النصفيِّ الآخر. تستطيعُ الأيوناتُ في المحلولَين أن تتحرَّكَ عبرَ الحاجزِ المساميِّ، مما يمنعُ الشحنةَ من التجمُّعِ على القطبَيْن. أما الإلكتروناتُ، فيمكنُ أن تنتقلَ من جهةٍ إلى أخرى عبرَ سلكٍ موصِّلٍ خارجيٍّ. يسري التيّارُ الكهربائيُّ في دارةٍ مغلقةٍ. هكذا تتوازنُ حركةُ الإلكتروناتِ عبرَ السلكِ الموصِّلِ مع حركةِ الأيوناتِ في المحلولِ.

إن تعديلَ النظامِ في الشكلِ 9-1، كما تمَّ وصفُه تمامًا، سيتضمَّنُ ببساطةٍ فصلَ النحاسِ عن الخارصينِ، كما هو مبيّنٌ في الشكلِ 9-2 حيثُ يوضعُ لوحُ الخارصينِ في محلولٍ مائيٍّ من $ZnSO_4$، ولوحُ النحاسِ في محلولٍ مائيٍّ من $CuSO_4$. وبما أن المحلولَيْن، موصِّلان للكهرباءِ، فهما يصنَّفان، كما تعلَّمْتَ في الفصلِ 1 من الجزءِ الأوّلِ، إلكتروليتاتٍ. ***القطبُ* electrode *موصِّلٌ يُستخدمُ لعملِ اتِّصالٍ كهربائيٍّ مع جزءٍ غيرِ فلزيٍّ (أيونيٍّ) في الدارةِ، مثلِ الإلكتروليت.*** في الشكلِ 9-2، لوحا Zn و Cu هما القطبان. ***والقطبُ المنفردُ المغمورُ في محلولٍ يحتوي على أيوناتِه هو نصفُ خليَّةٍ* half-cell**.

أنصافُ الخلايا

في نصفِ الخليَّةِ الذي يحتوي على القطبِ Zn في محلولٍ مائيٍّ من $ZnSO_4$، يكونُ التفاعلُ النصفيُّ $Zn(s) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + 2e^-$. يفقدُ فلزُّ Zn إلكترونَيْن ليكوِّنَ أيوناتِ Zn^{2+} في المحلولِ. تحدثُ أكسدةٌ في نصفِ الخليَّةِ هذا. ***القطبُ الذي تحدثُ عنده عمليَّةُ الأكسدةِ يُسمَّى الأنود* anode**. لذلك في نصفِ الخليَّةِ، الذي يحتوي على القطبِ Cu في محلولٍ مائيٍّ من $CuSO_4$، يكونُ التفاعلُ النصفيُّ على النحوِ التالي: $Cu^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Cu(s)$. في التفاعلِ النصفيِّ هذا، تكسبُ أيوناتُ Cu^{2+} إلكترونَيْن لتصبحَ Cu صلبًا، أي إن اختزالاً يحدثُ. ***القطبُ الذي تحدثُ عنده عمليَّةُ الاختزالِ يُسمَّى الكاثود* cathode**.

تذكرُ من الفصل 7 أن التفاعلَيْن النصفيَّيْن لا يمكنُ أن يحدثا بشكل منفصل، وأنّ كلاًّ من الأكسدةِ والاختزالِ يجبُ أن يحدثَ في تفاعلٍ كهروكيميائيٍّ. يؤلّفُ نصفا الخليتَيْن مجتمعَيْن خليَّةً كهروكيميائيَّةً. في الخليَّةِ الكهروكيميائيَّةِ Zn/Cu، تتحرَّكُ الإلكتروناتُ من القطبِ Zn عبرَ السلكِ، إلى القطبِ Cu، ثم إلى أيوناتِ Cu^{2+} الموجودةِ عندَ سطحِ التلامسِ بين القطبِ والمحلولِ. على هذا السطحِ تُختَزلُ أيوناتُ Cu^{2+} إلى Cu الصلبِ، وتترسَّبُ ذرّاتُ Cu الناتجةُ على سطحِ القطبِ Cu. في هذا التفاعلِ، تُنقلُ الشحنةُ عبرَ الحاجزِ بواسطةِ أيوناتِ $Zn^{2+}(aq)$ المتحرِّكةِ من الأنودِ إلى الكاثودِ، وأيوناتِ $SO_4^{2-}(aq)$ المتحرِّكةِ من الكاثودِ إلى الأنودِ.

فولتمتر
كاثودٌ نحاس
قنطرةٌ ملحيَّةٌ
أنودٌ خارصين
(أ)

الخليَّةُ الكاملةُ

يمكنُ أن تمثَّلَ الخليَّةُ الكهروكيميائيَّةُ بالترميزِ التالي من اليسارِ إلى اليمين:

قطبُ الكاثودِ | محلولُ الكاثودِ || محلولُ الأنودِ | قطبُ الأنودِ

الخطُّ العموديُّ المزدوجُ يمثِّلُ القنطرةَ الملحيَّةَ في الشكلِ 9-3(أ) أو الحاجزَ المساميَّ في الشكلِ 9-3(ب)، بين نصفَي الخليتَيْن. ويكونُ ترميزُ الخليَّةِ التي عُرِضَتْ سابقًا:

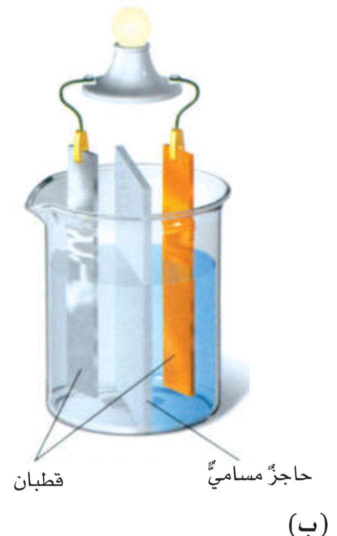
$$Zn(s)|Zn^{2+}(aq)||Cu^{2+}(aq)|Cu(s)$$

يمكنُ إيجادُ التفاعلِ الكهروكيميائيِّ بإضافةِ تفاعلِ الأنودِ النصفيِّ إلى تفاعلِ الكاثودِ النصفيِّ. هذا التفاعلُ النهائيُّ هو تفاعلُ الأكسدةِ–اختزالِ التالي:

$$Zn(s) + Cu^{2+}(aq) \rightarrow Zn^{2+}(aq) + Cu(s)$$

وبالرغمِ من حدوثِ التفاعلَيْن النصفيَّيْن في الوقتِ نفسِه، فإنهما يحدثان في مكانَيْن مختلفَيْن في الخليَّةِ. ولكي يحدثَ التفاعلُ، يجبُ أن تمرَّ الإلكتروناتُ في السلكِ الذي يربطُ بين نصفي الخليَّتَيْن.

يُطلقُ على الخليَّةِ الكهروكيميائيَّةِ التي تتألَّفُ من تفاعلِ Zn و Cu، والموصوفةِ أعلاه، اسمَ خليَّةِ دانييل، التي تحملُ اسمَ الكيميائيِّ الإنكليزيِّ جون فريدريك دانييل. تستطيعُ خليَّةُ دانييل أن تولِّدَ ما يكفي من الكهرباءِ لإضاءةِ المصباحِ المبيَّنِ في الشكلِ 9-3(ب). في الخلايا الكهروكيميائيَّةِ، إما أن يُنتِجَ التفاعلُ الكيميائيُّ طاقةً كهربائيَّةً، وإما أن يُنتِجَ التيّارُ الكهربائيُّ تغيُّرًا كيميائيًّا.



(ب)

الشكل 9-3 (أ) خليَّةٌ فولتيَّةٌ جلفانيَّةٌ في وجودِ قنطرةٍ ملحيَّةٍ. (ب) خليَّةٌ فولتيَّةٌ في وجودِ حاجزٍ مساميٍّ. التفاعلُ في هذه الخليَّةِ يمدُّ المصباحَ بالطاقةِ.

مراجعةُ القسمِ 9-1

1. لماذا يكونُ استخدامُ القنطرةِ الملحيَّةِ أو الحاجزِ المساميِّ ضروريًّا في الخليَّةِ الكهروكيميائيَّةِ؟

2. لديكَ التفاعلانِ النصفيّانِ $Cu^{2+}(aq)|Cu(s)$ و $Mg^{2+}(aq)|Mg(s)$، حيث $Cu^{2+}(aq)|Cu(s)$ هو تفاعلُ الكاثودِ.
   أ. اكتبِ التفاعلَ النهائيَّ.
   ب. اكتبْ ترميزَ الخليَّةِ.

3. اكتبِ التفاعلَ النصفيَّ الذي يتغيَّرُ فيه $I^-(aq)$ إلى $I_2(s)$. هل سيحدثُ هذا التفاعلُ عند الأنودِ أم عندَ الكاثودِ؟

تفكيرٌ ناقدٌ

4. **ربطُ أفكارٍ:** هل النتيجةُ الكيميائيَّةُ النهائيَّةُ لخليَّةٍ كهروكيميائيَّةٍ هي تفاعلُ أكسدةٍ–اختزالٍ؟ فسِّرْ إجابتَكَ.

القسم 2-9

الخلايا الفولتيَّةُ

مؤشِّراتُ الأداءِ

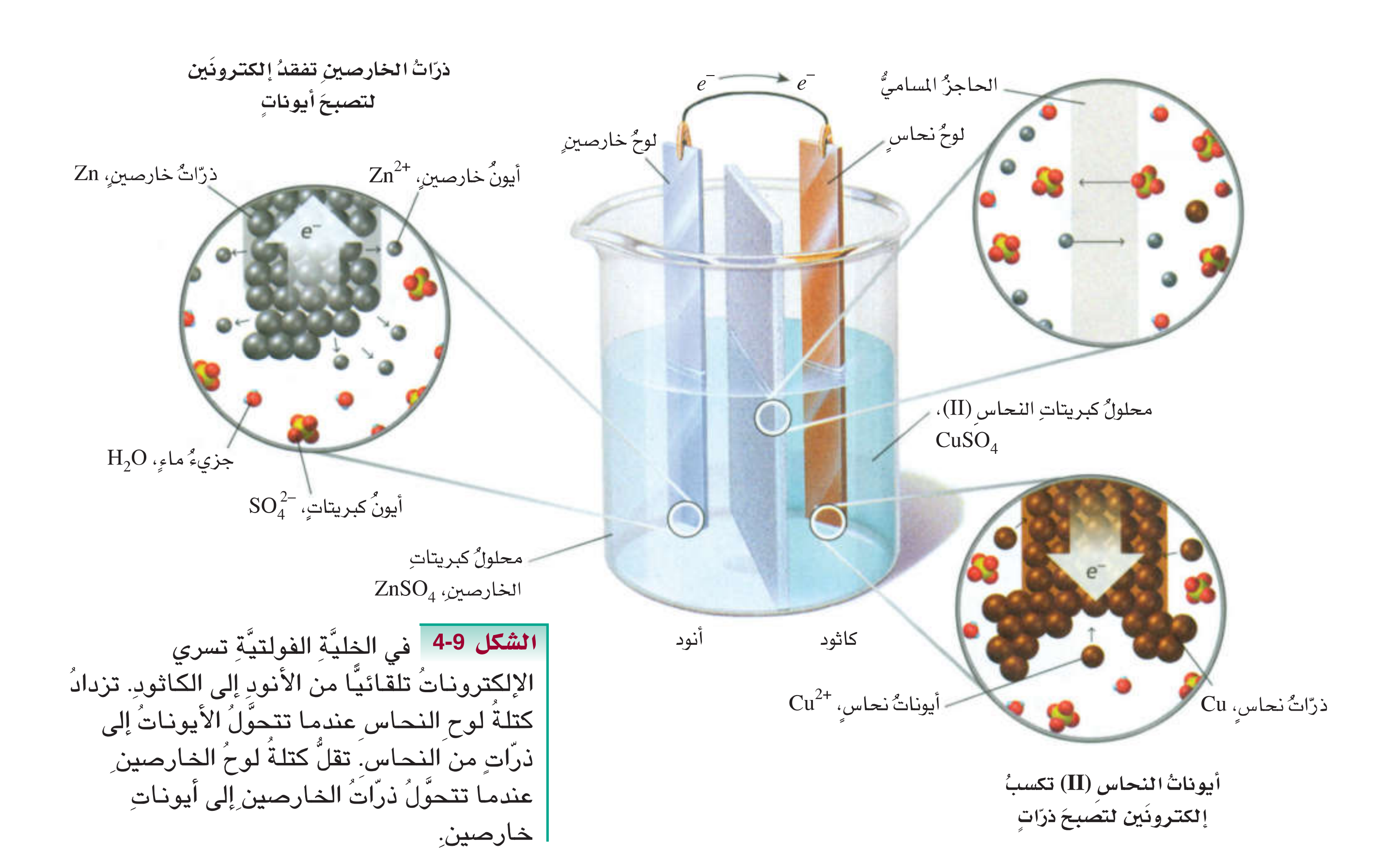
- يصفُ كيفيَّةَ عمل الخلايا الفولتيَّةِ، بما فيها الخلايا الجافَّةُ، وبطاريَّةُ السيارةِ، وخلايا الوقودِ.
- يحدِّدُ الظروفَ التي تؤدّي إلى التآكل، وطرقَ منعِه.
- يصفُ العلاقةَ بين الجهدِ وحركةِ الإلكترونات.
- يحسبُ جهدَ الخليَّةِ من جهودِ القطبِ القياسيَّةِ.

تستخدمُ **الخلايا الفولتيَّةُ voltaic cells** ***تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ التلقائيَّةَ لتحويلِ الطاقةِ الكيميائيَّةِ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.*** تُعرفُ الخلايا الفولتيَّةُ أيضًا بالخلايا الجلفانيَّةِ. التطبيقُ الأكثرُ شيوعًا للخلايا الفولتيَّةِ هو البطارياتُ.

كيفَ تعملُ الخلايا الفولتيَّةُ

يبيِّنُ الشكلُ 9-4 مثالاً على خليَّةٍ فولتيَّةٍ، وهي الخليَّةُ الكهروكيميائيَّةُ Zn||Cu التي تمَّتْ مناقشتُها في القسمِ السابقِ.

الإلكتروناتُ التي تمَّ فقدُها عندَ الأنودِ تمرُّ عبرَ سلكِ الموصِّلِ الخارجيِّ إلى الكاثودِ. ولا بدَّ لحركةِ الإلكتروناتِ عبرَ السلكِ من أن تُوازَنَ بحركةِ الأيوناتِ في المحلولِ. هكذا تستطيعُ أيوناتُ الكبريتاتِ في محلولِ $CuSO_4$، في الشكلِ 9-4، أن تتحرَّكَ عبر الحاجزِ المساميِّ إلى محلولِ $ZnSO_4$.



الشكل 9-4 في الخليَّةِ الفولتيَّةِ تسري الإلكتروناتُ تلقائيًّا من الأنودِ إلى الكاثودِ. تزدادُ كتلةُ لوحِ النحاسِ عندما تتحوَّلُ الأيوناتُ إلى ذرّاتٍ من النحاسِ. تقلُّ كتلةُ لوحِ الخارصينِ عندما تتحوَّلُ ذرّاتُ الخارصينِ إلى أيوناتِ خارصينٍ.

تعدُّ الخلايا الجافَّةُ الظاهرةُ في الشكلِ 9-5 مصادرَ شائعةً للطاقةِ الكهربائيَّةِ. هذه الخلايا الجافَّةُ هي، كما الخلايا السائلةُ التي تمَّ وصفُها سابقًا، خلايا فولتيَّةٌ. الأنواعُ الثلاثةُ الأكثرُ شيوعًا من الخلايا الجافَّةِ، هي بطّاريَّةُ الخارصينِ-الكربون، والبطاريَّةُ القلويَّةُ، وبطاريَّةُ الزئبقِ. تختلفُ هذه البطاريّاتُ باختلافِ الموادِّ المؤكسدةِ والمختزِلةِ.

الشكل 9-5 الكثيرُ من البطاريّاتِ الشائعةِ هي خلايا فولتيَّةٌ بسيطةٌ وجافَّةٌ.

خلايا الخارصين-الكربون الجافَّة

البطاريّاتُ المستخدمةُ في المصابيحِ الكهربائيَّةِ، هي خلايا الخارصينِ-الكربونِ الجافَّةِ. هذه الخلايا عبارةٌ عن وعاءِ خارصينٍ، يعملُ كأنودٍ، مملوءٍ بمعجونٍ رطبٍ من MnO_2، وجرافيتٍ، و NH_4Cl، كما هو مبيّنٌ في الشكلِ 9-6(أ). عندما تُقفلُ الدارةُ الخارجيَّةُ، تتأكسدُ ذرّاتُ الخارصينِ عند القطبِ السالبِ أو الأنودِ.

$$\overset{0}{Zn}(s) \rightarrow \overset{+2}{Zn}^{2+}(aq) + 2e^-$$

تتحرَّكُ الإلكتروناتُ عبرَ الدارةِ، وتدخلُ الخليَّةَ من جديدٍ بواسطةِ ساقٍ من الكربون. ساقُ الكربونِ هي الكاثودُ أو القطبُ الموجبُ، حيث يُختزلُ MnO_2 بوجودِ الماءِ، وفقًا للتفاعلِ النصفيِّ التالي:

$$2\overset{+4}{Mn}O_2(s) + H_2O(l) + 2e^- \rightarrow \overset{+3}{Mn}_2O_3(s) + 2OH^-(aq)$$

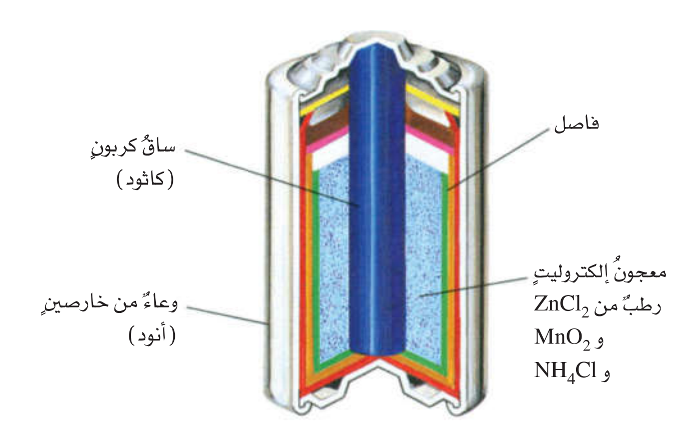
البطّاريّات القلويَّةُ

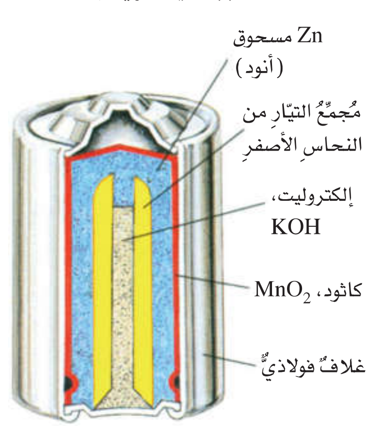
البطاريّاتُ الموجودةُ في جهازِ تشغيلِ الأقراصِ المدمجةِ المحمول، أو في الأجهزةِ الإلكترونيَّةِ الصغيرةِ، هي، في أكثرِ الأحيان، خلايا قلويَّةٌ جافَّةٌ. هذه الخلايا لا تحوي ساقًا من الكربونِ ككاثودٍ، كما في خليَّةِ الخارصينِ-الكربونِ. غيابُ ساقِ الكربونِ يسمحُ لهذه الخلايا بأن تكونَ أصغرَ حجمًا. يبيِّنُ الشكلُ 9-6(ب) نموذجًا لبطاريَّةٍ قلويَّةٍ. تستخدمُ هذه الخليَّةُ معجونًا من فلزِّ الخارصينِ وهيدروكسيدِ البوتاسيوم، بدلاً من الأنودِ الفلزّيِّ الصلبِ. يتمثّلُ التفاعلُ النصفيُّ عندَ الأنودِ بالتالي:

$$\overset{0}{Zn}(s) + 2OH^-(aq) \rightarrow \overset{+2}{Zn}(OH)_2(s) + 2e^-$$

التفاعلُ النصفيُّ للاختزال، الذي يحدثُ عندَ الكاثودِ، هو نفسُهُ التفاعلُ الذي يحدثُ في خليَّةِ الخارصينِ-الكربونِ الجافَّةِ.

الشكل 9-6 (أ) في خليَّةِ الخارصينِ-الكربونِ الجافَّةِ، يتأكسدُ الخارصينُ إلى Zn^{2+} عند الأنودِ، ويُختزلُ المنجنيزُ (IV) إلى المنجنيزِ (III) عندَ الكاثودِ. (ب) يجعلُ KOH معجونَ الإلكتروليتِ في هذه البطاريَّةِ قاعديًا. لذلك تُسمّى الخليَّةَ القلويَّةَ الجافَّةَ.





الشكل 9-7 من المهمِّ إعادةُ تدويرِ بطاريّاتِ الزئبق، وليس رميَها، لأنَّ الزئبقَ مادَّةٌ سامَّةٌ.

بطّاريّاتُ الزئبقِ

البطّاريّاتُ الصغيرةُ جدًّا الموجودةُ في وسائلِ تقويةِ السمعِ، وفي الآلاتِ الحاسبةِ، وفي فلاشاتِ الكاميراتِ، هي بطّاريّاتُ زئبق، كما يبيِّنُ الشكلُ 9-7. يماثلُ التفاعلُ النصفيُّ للأنودِ التفاعلَ النصفيَّ الموجودَ في الخليَّةِ القلويَّةِ الجافَّةِ. لكنَّ التفاعلَ النصفيَّ للكاثودِ أو للاختزالِ تفاعلٌ مختلفٌ. يوصفُ التفاعلُ النصفيُّ للكاثودِ بالمعادلةِ التاليةِ:

$$\overset{+2}{Hg}O(s) + H_2O(l) + 2e^- \rightarrow \overset{0}{Hg}(l) + 2OH^-(aq)$$

خلايا الوقودِ

خليَّةُ الوقودِ خليَّةٌ فولتيَّةٌ حيثُ يتمُّ تزويدُ المتفاعلاتِ باستمرارٍ، بينما تتمُّ إزالةُ النواتجِ بشكلٍ متواصلٍ. فهي، بخلافِ البطاريَّةِ، تستطيعُ، من حيثُ المبدأ، أن تعملَ إلى الأبدِ، بتحويلِ الطاقةِ الكيميائيَّةِ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.

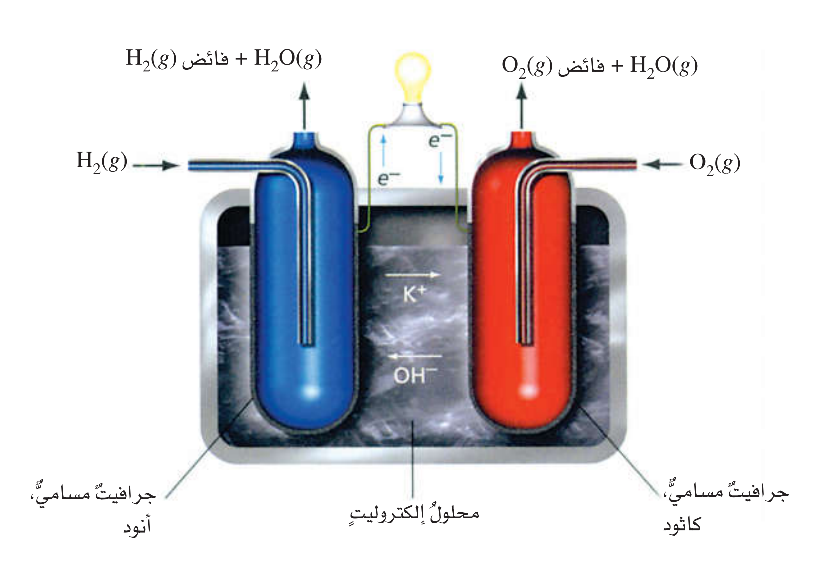
تُستخدمُ خلايا الوقودِ التي تستندُ إلى التفاعلاتِ الموضَّحةِ أدناه في برامجِ الفضاءِ. هذه الخلايا مبيَّنةٌ في الشكلِ 9-8.

كاثود: $O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$

أنود: $2H_2(g) + 4OH^-(aq) \rightarrow 4e^- + 4H_2O(l)$

التفاعلُ النهائيُّ: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

خلايا الوقودِ خلايا فعّالةٌ جدًّا، ونواتجُها آمنةٌ بيئيًّا.



الشكل 9-8 تحدثُ التفاعلاتُ في خليَّةِ الوقودِ هذه، عندَ قطبَيِ الكربونِ الذي يحتوي على حفّازٍ فلزّيٍّ. الماءُ المتكوِّنُ تتمُّ إزالتُه على شكلِ بخارٍ.

التآكلُ (الصدأ) ومنعُه

التآكلُ عمليَّةٌ كهروكيميائيَّةٌ لها تأثيرٌ اقتصاديٌّ كبيرٌ، فمثلاً 20% من مجمل الحديدِ والفولاذِ المُنتج يُستخدمُ لإصلاحِ الهياكلِ والأبنيةِ المتآكلةِ أو لاستبدالِها. والحديدُ هو الفلزُّ الأكثرُ تأثُّرًا بالتآكلِ أي الصدأ، أي التحوُّلِ إلى أكسيدِ الحديدِ (III) المائيِّ، الذي يُنتجُ خلالَ التفاعلِ العامِّ التالي:

$$4Fe(s) + 3O_2(g) + xH_2O(l) \rightarrow 2Fe_2O_3 \bullet xH_2O(s)$$

ويختلفُ عددُ جزيئاتِ الماءِ x مما يؤدّي إلى اختلافِ لونِ الصدأ.

ويفسَّرُ تآكلُ الحديدِ من خلالِ التفاعلاتِ الكهروكيميائيَّةِ التاليةِ:

أنود: $Fe(s) \rightarrow 2e^- + Fe^{2+}(aq)$

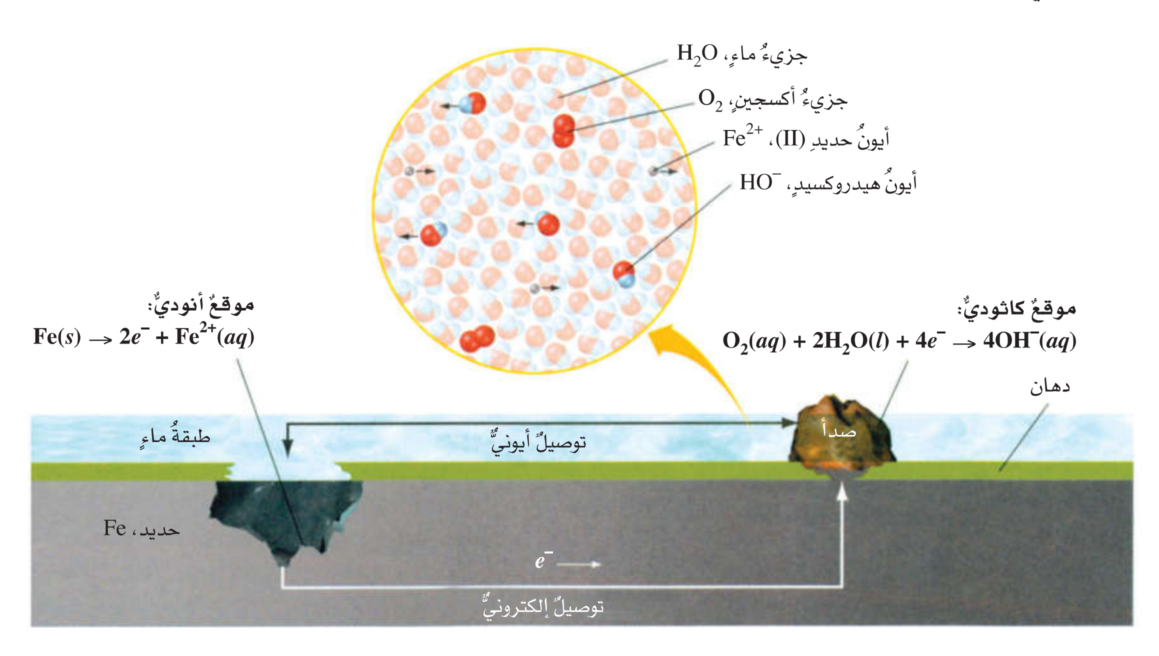
كاثود: $O_2(g) + 2H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 4OH^-(aq)$

يحدثُ تفاعلا الأنودِ والكاثودِ في مناطقَ مختلفةٍ من سطحِ الفلزِّ. والدارةُ الكهربائيَّةُ تكتملُ بتدفُّقِ إلكتروناتٍ عبر الفلزِّ نفسِه، الذي يعملُ مثل السلكِ في خليَّةٍ كهروكيميائيَّةٍ. يعملُ الماءُ على سطحِ الفلزِّ كقنطرةٍ ملحيَّةٍ. ولكَيْ يحدثَ التآكلُ، لا بُدَّ من وجودِ الماءِ والأكسجينِ مع الحديدِ.

عندما يتعرَّضُ الحديدُ للماءِ والأكسجينِ، كما يبيِّنُ الشكلُ 9-9، يتأكسدُ فلزُّ الحديدِ عند الموقعِ الأنودي إلى الأيوناتِ Fe^{2+}. الإلكتروناتُ الناتجةُ عند هذا الموقعِ تتحرَّكُ عبرَ الفلزِّ (مثلَ السلكِ في الخليَّةِ) إلى المنطقةِ الكاثوديَّةِ، حيث يُختزلُ الأكسجينُ. تتحرَّكُ أيوناتُ Fe^{2+} عبرَ الماءِ باتجاهِ المناطقِ الكاثوديَّةِ. تتَّحدُ أيوناتُ Fe^{2+} مع أيوناتِ OH^- مكوِّنةً $Fe(OH)_2$ الذي يتأكسدُ مكوِّنًا الصدأ (أكسيدَ الحديدِ المائيَّ $Fe_2O_3 \bullet xH_2O$).

ومما يسرِّعُ في عمليَّةِ التآكلِ وجودُ الأملاحِ الذائبةِ أو ارتفاعُ حمضيَّةِ الوسطِ، لأن زيادةَ وجودِ الأيوناتِ يسهِّلُ حركةَ الإلكتروناتِ.

كيف يمكنُ منعُ التآكلِ؟ إحدى الوسائلِ، التي تستخدمُ الخصائصَ الكهروكيميائيَّةَ للفلزّاتِ، تقتضي تغليفَ الفولاذِ بالخارصينِ، في عمليَّةٍ تُسمى بـ «الجلفنة»



الشكل 9-9 يحدثُ التفاعلُ الكاثوديُّ حيثُ يكونُ تركيزُ O_2 عاليًا. بينما يحدثُ التفاعلُ الأنوديُّ في المنطقةِ التي يكونُ فيها تركيزُ O_2 منخفضًا مثل الحفرةِ في الفلزِّ.

الشكل 9-10 خطُّ أنابيبِ نفطٍ محميٌّ كاثوديًّا بواسطةِ كابلٍ موازٍ من الخارصينِ.

(الطلاء بالخارصين). يتأكسدُ الخارصينُ بسهولةٍ أكبرَ من الحديدِ لذلك، يتأكسدُ الخارصينُ قبلَ الحديدِ. وهذا ما يُسمّى بـ «الحمايةِ الكاثوديَّةِ» ويُسمّى الفلزُّ المستخدمُ الذي يتأكسدُ بسهولةٍ أكبرَ بـ «الأنودِ المتآكلِ».

يعدُّ خطُّ أنابيبِ النفطِ المبيَّنُ في الشكلِ 9-10، مثالاً على الفولاذِ المحميِّ كاثوديًّا. لكن، بدلَ التغليفِ، يوصَّلُ الخارصينُ بالأنابيبِ بواسطةِ سلكٍ معدنيٍّ. في هذه الحالةِ، يتأكسدُ الخارصينُ قبلَ الحديدِ في الفولاذِ. عندما يتآكلُ أنودُ الخارصينِ يُعطي الإلكتروناتِ للكاثودِ، أي الفولاذِ. وعندما يقومُ الخارصينُ بذلك، يمنعُ الفولاذَ من التآكلِ. عندما يتآكلُ الخارصينُ تدعو الحاجةُ إلى استبدالِه. ومادامَ يوجدُ فلزُّ الخارصينِ القادرِ على التآكلِ، فإن الفولاذَ يبقى محميًّا من التآكلِ.

الجهدُ الكهربائيُّ

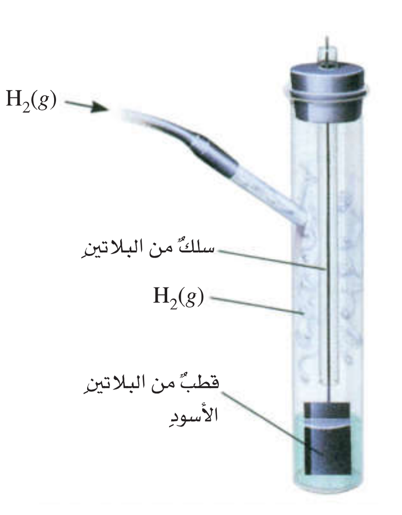
في الخليَّةِ الفولتيَّةِ، يقومُ العاملُ المؤكسِدُ عند الكاثودِ بسحبِ الإلكتروناتِ عبر السلكِ المعدنيِّ، بعيدًا عن العاملِ المختزِلِ عند الأنودِ. ***قوةُ سحبِ الإلكتروناتِ، أو القوى الدافعةُ على الإلكتروناتِ، تُسمَّى الجهدَ الكهربائيَّ*** **electric potential**. يتمُّ التعبيرُ عن الجهدِ الكهربائيِّ، أو الفولتيَّةِ، بوحدةِ الفولتِ (V). فالفولتُ يمثِّلُ الطاقةَ الكامنةَ potential energy لكلِّ وحدةِ شحنةٍ. أما التيّارُ فهو حركةُ الإلكتروناتِ، ويُعبَّرُ عنه بوحدةِ الأمبيرِ أو (A).

والجهدُ الكهربائيُّ أشبهُ بماءٍ يتدفَّقُ من مستوى عالٍ إلى مستوى أدنى، بفعلِ الجاذبيَّةِ. بقدرِ ما يكونُ الفرقُ كبيرًا في الارتفاعِ (الجهدِ الناتجِ عن الجاذبيَّةِ) يكونُ سحبُ الماءِ قويًّا إلى المستوى الأدنى.

جهودُ الأقطابِ

تأمَّلْ من جديدٍ الخليَّةَ الفولتيَّةَ المبيّنةَ في الشكلِ 9-4. هناك قطبان Zn و Cu ولكلٍّ من هذَين الفلزَّيْن ميلٌ مختلفٌ لاستقبالِ الإلكتروناتِ. ***إن ميلَ التفاعلِ النصفيِّ للحدوثِ كتفاعلٍ نصفيٍّ للاختزالِ في خليَّةٍ كهروكيميائيَّةٍ يعبَّرُ عنه بجهدِ الاختزالِ*** **reduction potential**. في الشكلِ 9-4 نصفا خليتَيْن: لوحُ خارصينَ في محلولٍ من $ZnSO_4$، ولوحُ نحاس في محلولٍ من $CuSO_4$. ***يُعرفُ الفرقُ في الجهدِ بين القطبِ ومحلولِه باسمِ جهدِ القطبِ*** **electrode potential**. عندما يتمُّ وصلُ هذَين النصفَيْ خليتَيْن ويبدأُ التفاعلُ، يُلاحظُ فرقٌ في الجهدِ بين القطبَين. فرقُ الجهدِ هذا، أو ما يُسمّى بالفولتيَّةِ، يتناسبُ مع الطاقةِ اللازمةِ لتحريكِ شحنةٍ كهربائيَّةٍ معيَّنةٍ بين القطبَين. إن وصلَ فولتمترٍ عبرَ الخليَّةِ الفولتيَّةِ Zn || Cu يقيسُ فرقَ جهدٍ 1.10 V تقريبًا، عندما يكونُ تركيزُ محلولَي الأيوناتِ Zn^{2+} و $1\ M\ Cu^{2+}$ لكلٍّ منهما.

يتمُّ قياسُ فرقِ الجهدِ عبرَ الخليَّةِ الفولتيَّةِ الكاملةِ بسهولةٍ، وهو يساوي مجموعَ جهدِ القطبَين للتفاعلَين النصفيَّين. لكن لا يمكنُ قياسُ جهدِ قطبٍ بمفردِه مباشرةً. إذ لا يمكنُ أن يحدثَ انتقالُ إلكتروناتٍ، إلا إذا تمَّ التوصيلُ بين الأنودِ والكاثودِ، ليكوّنا دارةً تامَّةً. ولكن يمكنُ تحديدُ القيمةِ النسبيَّةِ لجهدِ التفاعلِ النصفيِّ عبر وصلِه بنصفِ خليَّةٍ قياسيَّةٍ كمرجعٍ. ومن أشهرِها قطبُ الهيدروجينِ القياسيُّ standard hydrogen electrode، أو SHE، المبيَّنُ في الشكلِ 9-11. وهو يتكوَّنُ من



الشكل 9-11 قطبُ الهيدروجينِ قطبٌ قياسيٌّ مرجعٌ لقياسِ جهودِ القطبِ. سطحُ القطبِ المتّصلِ معَ المحلولِ هو طبقةٌ من الهيدروجينِ ممتزَّةٌ على سطحِ البلاتينِ.

قطبٌ من البلاتينِ يُغمرُ في محلولٍ حمضيٍّ 1.00 M، ويحيطُ بهذا المحلولِ غازُ الهيدروجينِ تحتَ ضغطِ 1 atm، وعند درجةِ حرارةٍ 25°C. تُرتَّبُ الأقطابُ الأخرى تبعًا لقدرتِها على اختزالِ الهيدروجينِ تحتَ هذه الظروفِ.

يوصفُ التفاعلُ الأنوديُّ لقطبِ الهيدروجينِ القياسيِّ بالتفاعلِ النصفيِّ الأماميِّ، في معادلةِ الاتِّزانِ التاليةِ:

$$\overset{0}{H_2}(g) \rightleftarrows \overset{+1}{2H^+}(aq) + 2e^-$$

أما التفاعلُ الكاثوديُّ النصفيُّ، فهو التفاعلُ العكسيُّ. يُعيَّنُ جهدٌ اختياريٌّ من 0.00 V لكلا هذَين التفاعلَين النصفيَّين. ***تحت الشروطِ القياسيَّةِ، يكونُ جهدُ نصفِ الخليَّةِ، المقيسُ بالنسبةِ إلى قطبِ الهيدروجينِ القياسيِّ، هو جهدُ القطبِ القياسيِّ*** **standard electrode potential**، E^0. تعدُّ جهودُ الاختزالِ مؤشّرًا أكيدًا على ميلِ مادَّةٍ معيَّنةٍ إلى الاختزالِ. يبيّنُ الشكلُ 9-12 كيف يُستخدمُ SHE لإيجادِ جُهدَي القطبِ لنصفَي خليتَي الخارصينِ والنحاسِ. يوضّحُ الجدولُ 9-1 على الصفحةِ التاليةِ التفاعلَ النصفيَّ لبعضِ الأقطابِ الشائعةِ، وجهدَ اختزالِ كلٍّ منها.

العواملُ المؤكسدةُ القويَّةُ، مثل Cu^{2+} و F_2، لها قيمُ E^0 موجبةٌ. والتفاعلاتُ النصفيَّةُ التي لها جهودُ اختزالٍ سالبةٌ تفضّلُ الأكسدةَ على الاختزالِ. تدلُّ قيمُ E^0 السالبةُ على أن الفلزَّ، أو أيَّ قطبٍ آخرَ، لديه قابليَّةُ منحِ الإلكتروناتِ أكثرَ من الهيدروجينِ. فالعواملُ المختزِلةُ القويَّةُ، مثلُ Li و Zn، لها قيمُ E^0 سالبةٌ.

عندما يُكتبُ التفاعلُ النصفيُّ بشكلِ تفاعلِ أكسدةٍ، تُعكسُ إشارةُ جهدِ قطبِه، كما تبيّنُ التفاعلاتُ النصفيَّةُ للأكسدةِ والاختزالِ للخارصينِ.

$$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn \qquad E^0 = -0.76\ V$$
$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad E^0 = +0.76\ V$$

يبلغُ فرقُ الجهدِ عبرَ خليَّةِ الهيدروجينِ-الخارصينِ 0.76 V–. هكذا يعدُّ جهدُ اختزالِ الخارصينِ مساويًا لـ 0.76 V–. تدلُّ الإشارةُ السالبةُ على أن الإلكتروناتِ تتدفَّقُ من قطبِ الخارصينِ (حيثُ يتأكسدُ الخارصين) إلى قطبِ الهيدروجينِ، حيث تُختزلُ أيوناتُ الهيدروجينِ.

إذا ارتبطَ نصفُ خليَّةِ النحاسِ بقطبِ الهيدروجينِ القياسيِّ، فإن قياسَ فرقِ الجهدِ يكونُ 0.34 V+. تدلُّ الإشارةُ الموجبةُ على أن أيوناتِ $Cu^{2+}(aq)$ تُختزلُ بسهولةٍ أكبرَ من أيوناتِ $H^+(aq)$.

الشكل 9-12 يقاسُ جُهدا القطبِ لنصفَي خليَّتَي الخارصينِ والنحاسِ بوصلِهما مع قطبِ الهيدروجينِ القياسيِّ.

يمكنُ استخدامُ جهودِ الاختزالِ القياسيَّةِ لتوقُّعِ إن كان تفاعلُ الأكسدةِ-اختزالٍ سيحدثُ تلقائيًّا. وفي هذه الحالةِ تكونُ قيمةُ E^0 موجبةً، ويمكنُ حسابُ E^0 للخليَّةِ من المعادلةِ التاليةِ:

$$E^0_{\text{خلية}} = E^0_{\text{كاثود}} - E^0_{\text{أنود}}$$

التفاعلُ النصفيُّ، الذي لديه جهدُ الاختزالِ القياسيُّ الأكثرُ سالبيَّةً، سيكونُ الأنودَ. بما أن الأكسدةَ تحدثُ عندَ الأنودِ، فإن تفاعلَ نصفِ خليَّةِ الأنودِ سيكونُ عكسَ تفاعلِ الاختزالِ الواردِ في الجدولِ 9-1. لذلك يُحسبُ الجهدُ الكليُّ للخليَّةِ بطرحِ جهدِ الاختزالِ القياسيِّ لتفاعلِ الأنودِ ($E^0_{\text{أنود}}$) من جهدِ الاختزالِ القياسيِّ لتفاعلِ الكاثودِ ($E^0_{\text{كاثود}}$).

الجدول 9-1 جهودُ الاختزالِ القياسيَّةُ

تفاعلُ نصفِ الخليَّةِ	جهدُ الاختزالِ القياسيُّ، E^0 (بالفولت)
$F_2 + 2e^- \rightleftarrows 2F^-$	+2.87
$MnO_4^- + 8H^+ + 5e^- \rightleftarrows Mn^{2+} + 4H_2O$	+1.49
$Au^{3+} + 3e^- \rightleftarrows Au$	+1.42
$Cl_2 + 2e^- \rightleftarrows 2Cl^-$	+1.36
$Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightleftarrows 2Cr^{3+} + 7H_2O$	+1.33
$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightleftarrows Mn^{2+} + 2H_2O$	+1.21
$Br_2 + 2e^- \rightleftarrows 2Br^-$	+1.07
$Hg^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Hg$	+0.85
$Ag^+ + e^- \rightleftarrows Ag$	+0.80
$Hg_2^{2+} + 2e^- \rightleftarrows 2Hg$	+0.80
$Fe^{3+} + e^- \rightleftarrows Fe^{2+}$	+0.77
$MnO_4^- + e^- \rightleftarrows MnO_4^{2-}$	+0.56
$I_2 + 2e^- \rightleftarrows 2I^-$	+0.54
$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Cu$	+0.34
$Cu^{2+} + e^- \rightleftarrows Cu^+$	+0.16
$S + 2H^+(aq) + 2e^- \rightleftarrows H_2S(aq)$	+0.14
$2H^+(aq) + 2e^- \rightleftarrows H_2$	+0.00
$Fe^{3+} + 3e^- \rightleftarrows Fe$	–0.04
$Pb^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Pb$	–0.13
$Sn^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Sn$	–0.14
$Ni^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Ni$	–0.23
$Co^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Co$	–0.28
$Cd^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Cd$	–0.40
$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Fe$	–0.41
$S + 2e^- \rightleftarrows S^{2-}$	–0.51
$Cr^{3+} + 3e^- \rightleftarrows Cr$	–0.74
$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Zn$	–0.76
$Al^{3+} + 3e^- \rightleftarrows Al$	–1.66
$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Mg$	–2.37
$Na^+ + e^- \rightleftarrows Na$	–2.71
$Ca^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Ca$	–2.76
$Ba^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Ba$	–2.90
$K^+ + e^- \rightleftarrows K$	–2.93
$Li^+ + e^- \rightleftarrows Li$	–3.04

مسألةٌ نموذجية 1-9

اكتبِ التفاعلَ النهائيَّ للخليَّةِ، واحسبْ جهدَ الخليَّةِ للخليَّةِ الفولتيَّةِ المكوَّنةِ من نصفَي الخليَّتيْن التاليَين: قطبِ حديدٍ (Fe) في محلولٍ من $Fe(NO_3)_3$ وقطبِ فضّةٍ (Ag) في محلولٍ من $AgNO_3$.

الحلّ

1 حلّل

المعطى: نصفُ خليَّةٍ يتكوَّنُ من $Fe(s)$ في $Fe(NO_3)_3(aq)$، ونصفُ خليَّةٍ ثانٍ يتكوَّنُ من $Ag(s)$ في $AgNO_3(aq)$.

المجهول: $E^0_{\text{خلية}}$

2 خطّطْ

1. جدْ E^0 لكلِّ تفاعلٍ نصفيٍّ (مكتوبٍ بشكلِ اختزالٍ) من الجدول 1-9.

$$Fe^{3+}(aq) + 3e^- \rightarrow Fe(s) \quad E^0 = -0.04\ V \qquad Ag^+(aq) + e^- \rightarrow Ag(s) \quad E^0 = +0.80\ V$$

2. حدِّدِ الكاثودَ والأنودَ.

Fe في $Fe(NO_3)_3$ هو الأنودُ، لأن جهدَ اختزالِه أقلُّ من Ag. لذلك، Ag في $Ag(NO_3)$ هو الكاثودُ.

3 احسبْ

1. حدِّدِ التفاعلَ النهائيَّ للخليَّةِ، اضربْ تفاعلَ Ag النصفيَّ في 3، بحيثُ يساوي عددُ الإلكتروناتِ المكتسبةِ في هذا التفاعلِ النصفيِّ عددَ الإلكتروناتِ المفقودةِ خلالَ أكسدةِ الحديدِ. اعكسْ تفاعلَ الحديدِ النصفيِّ، ليكونَ نصفَ تفاعلِ أكسدةٍ.

$$3Ag^+(aq) + Fe(s) \rightarrow 3Ag(s) + Fe^{3+}(aq)$$

2. احسبْ جهدَ الخليَّةِ من $E^0_{\text{أنود}} - E^0_{\text{كاثود}} = E^0_{\text{خلية}}$. لاحظِ التالي: عندما يُضربُ التفاعلُ النصفيُّ بثابتٍ، لا يُضربُ E^0 بهذا الثابتِ، بل يبقى نفسَه.

$$E^0_{\text{خلية}} = E^0_{\text{كاثود}} - E^0_{\text{أنود}} = +0.80\ V - (-0.04\ V) = +0.84\ V$$

4 قيِّمْ

القيمةُ المحسوبةُ لـ $E^0_{\text{خلية}}$ موجبةٌ، ما يؤكِّدُ أن الخليَّةَ فولتيَّةٌ، كما يذكرُ نصُّ المسألةِ.

تمارينُ تطبيقية

1. حدِّدْ لكلِّ زوجٍ من أنصافِ الخلايا، التفاعلَ الكهروكيميائيَّ النهائيَّ الذي يحدثُ تلقائيًّا، وكذلك قيمةَ E^0.

أ. $Cr_2O_7^{2-}/Cr^{3+}$ و Ni^{2+}/Ni

ب. Fe^{2+}/Fe^{3+} و H^+/H_2 (SHE)

الجواب

1. أ. $Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 3Ni \rightarrow 2Cr^{3+} + 3Ni^{2+} + 7H_2O$

$E^0 = 1.33 - (-0.23) = 1.56\ V$

ب. $2Fe^{3+} + H_2 \rightarrow 2Fe^{2+} + 2H^+$

$E^0 = 0.77 - 0.0 = 0.77\ V$

مراجعةُ القسم 2-9

1. ما الخليَّةُ الفولتيَّةُ؟

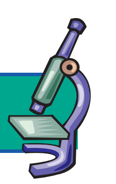
2. ما جهدُ القطبِ؟

3. حدِّدِ التفاعلَ الكهروكيميائيَّ النهائيَّ الذي يحدثُ تلقائيًّا، وكذلك قيمةَ E^0 للخليَّةِ المكوَّنةِ من أنصافِ الخلايا Na^+/Na و K^+/K.

4. حدِّدِ التفاعلَ الكهروكيميائيَّ النهائيَّ الذي يحدثُ تلقائيًّا، وكذلك قيمةَ E^0 للخليَّةِ المكوَّنةِ من أنصافِ الخلايا MnO_2/Mn^{2+} و Cr^{3+}/Cr.

تفكيرٌ ناقد

5. **تقييم أفكار:** الأنودُ المتآكلُ يمكنُ أن يتأكسدَ. لماذا يُعدُّ استخدامُ الأنودِ المتآكلِ وسيلةً لمنعِ التآكلِ؟



قراءةٌ علميَّةٌ

سياراتُ خلايا الوقودِ

سيارةُ المستقبلِ سيارةٌ بلا ضوضاءٍ، مخلّفاتُها غيرُ ضارَّةٍ. وتتطلَّبُ صيانةً أقلَّ من سياراتِ اليومِ. هذا ما تعِدُنا به السياراتُ العاملةُ على خلايا الوقودِ. لكنَّ هناك عددًا من القضايا في حاجةٍ إلى الحلِّ قبلَ أن تصبحَ صناعةُ سياراتِ خلايا الوقودِ، على نطاقٍ واسعٍ، قابلةً للتنفيذِ. هذه القضايا تتضمَّنُ قدرةَ السيارةِ على تخزينِ الوقودِ، وكذلك البنيةَ التحتيَّةَ للتزوُّدِ بالوقودِ.

التكنولوجيا المفضَّلةُ حاليًّا للسياراتِ هي خليَّةُ الوقودِ المزوَّدةُ بغشاءِ تبادلِ البروتونِ proton-exchange fuel membrane (PEM). يعملُ النظامُ بمزجِ الهيدروجينِ مع الأكسجينِ المأخوذِ من الهواءِ الخارجيِّ. تقومُ حركةُ الإلكتروناتِ (المُنتجةِ من تفاعلِ الأكسدةِ-اختزال) عبرَ سلكٍ خارجيٍّ بتوليدِ الكهرباءِ التي تُستخدمُ لدورانِ عجلاتِ السيارةِ. تتمتَّعُ هذه العمليَّةُ بكفاءةٍ أعلى مرّتَين إلى ثلاثِ مرّاتٍ من محرِّكِ الاحتراقِ الداخليِّ. والناتجُ الوحيدُ لها هو الماءُ، وكمّيَّةٌ معتدلةٌ من الطاقةِ، على صورةِ حرارةٍ. في معظمِ الحالاتِ، تُستخدمُ بطاريَّةُ سيارةٍ تقليديَّةٍ لتشغيلِ نظامِ السيارةِ الكهربائيِّ.

في المبدأ، يمكنُ تشغيلُ خلايا الوقودِ بأيِّ وقودٍ غنيٍّ بالهيدروجينِ. لقد تمَّتْ دراسةُ الكثيرِ من أنواعِ الوقودِ المرشَّحةِ لتزويدِ خلايا الوقودِ بالطاقةِ، مثل: الميثانولِ، الإيثانولِ، الغازِ الطبيعيِّ، البنزينِ، الهيدروجينِ السائلِ أو المضغوطِ. إذا لم يكنِ الوقودُ المستخدمُ غازَ الهيدروجينِ، فإن المحرِّكَ لا بدَّ له من جهازٍ محسّنٍ يستطيعُ تحويلَ أنواعِ الوقودِ الأخرى (مثل الميثانول) إلى هيدروجينٍ.

في نهايةِ الأمرِ، قد تحلُّ سياراتُ خلايا الوقودِ، مثل هذه السيارةِ، محلَّ السياراتِ العاملةِ على البنزينِ.

إن مجالَ خليَّةِ الوقودِ التي تزوِّدُ السيارةَ بالطاقةِ محدودٌ بكمّيَّةِ الوقودِ التي يمكنُ تخزينُها في خزانِ الوقودِ. التخزينُ الحاليُّ يحدِّدُ الآن مجالَ السياراتِ بـ 100 km، قبل أن يُعادَ تزويدُها بالوقودِ. يبحثُ المهتمّون في هذا المجالِ في أنظمةِ الكربونِ للامتزازِ التي هي خزاناتٌ مبرَّدةٌ مضغوطةٌ تخزِّنُ كمّيّاتٍ كبيرةً من الهيدروجينِ. الهيدروجينُ مادَّةٌ قابلةٌ جدًّا للاحتراقِ. لكن تمَّ تطويرُ خزّاناتٍ آمنةٍ للهيدروجينِ. لذلك لم يعدْ يشغلُ الخبراءَ موضوعُ سلامةِ تخزينِ الهيدروجينِ. لكن تخزينَ البنزينِ لا يزالُ يشكِّلُ خطرًا على السلامةِ.

مع ذلك، لم تنتشرْ بعدُ محطاتُ وقودِ الهيدروجينِ على الأرضِ. فالمستخدمون التجريبيّون الحاليّون، ومنهم المؤسساتُ الحكوميَّةُ، لهم محطاتُ وقودِ الهيدروجينِ الخاصَّةُ بهم. وتقولُ شركاتُ السياراتِ بأن هناك حاجةً إلى بنيةٍ تحتيَّةٍ تُعدُّ لسياراتِ خلايا وقودِ الهيدروجينِ، قبلَ أن يبدأَ المستهلكون بالشراءِ. من ناحيةٍ أخرى، يقولُ المطوِّرون المحتملون لمثل هذه المحطاتِ أن هناك حاجةً لوجودِ طلبٍ على وقودِ الهيدروجين قبلَ إنشاءِ البنيةِ التحتيَّةِ.

إن استخدامَ بعضِ أنواعِ الوقودِ، مثل الميثانولِ، يحلُّ مشكلةَ التخزينِ، وقضيَّةَ البنيةِ التحتيَّةِ، لأن هذه الأنواعَ يمكنُ تخزينُها بطريقةٍ مشابهةٍ لتخزينِ البنزينِ. لذلك يمكنُ أن تُباعَ هذه الأنواعُ من الوقودِ في محطّاتِ البنزينِ الحاليَّةِ. يجبُ أيضًا اعتبارُ المخلَّفاتِ واستخدامِ الطاقةِ اللذين يتضمنُّهما صنعُ وقودِ الهيدروجينِ وتوزيعُه، إضافةً إلى المخلَّفاتِ من خليَّةِ وقودِ الهيدروجينِ. قد يتضمنُ إنتاجُ وقودِ الهيدروجينِ نفسُه مخلَّفاتٍ كبيرةً. رغم ذلك، فإن سياراتِ خلايا الوقودِ تبقى أكثرَ فاعليَّةً، ولها فوائدُ بيئيَّةٌ أكبرُ من سياراتِ اليوم ذاتِ محرِّكاتِ الاحتراقِ الداخليِّ.

حاليًّا، تقومُ جميعُ شركاتِ السياراتِ الرئيسةِ بأبحاثٍ حولَ سياراتِ خلايا الوقودِ. كما أن معظمَ الشركاتِ صنعَتْ نماذجَ سياراتٍ أوليَّةٍ. ووضعَتْ بعضُ السياراتِ في الخدمةِ لدى المؤسساتِ الحكوميَّةِ. لكنَّ النوعَ الذي سينجحُ أخيرًا في الأسواقِ العامَّةِ لا يزالُ مجهولاً، مع أن الخبراءَ يتَّفقونَ على أن الهيدروجينَ، هو، للسياراتِ عديمةِ المخلَّفاتِ، خيارُ الوقودِ الرئيسُ الوحيدُ الذي تمَّ، حتى الآنَ، تحديدُ هويَّتِه.

أسئلة

1. خلايا الوقودِ التي تستخدمُ الهيدروجينَ كوقودٍ تُنتجُ الماءَ وكمّيّاتٍ معتدلةً من الطاقةِ على صورةِ حرارةٍ، بصفتها المخرجاتِ الوحيدةَ. ما أنواعُ التأثيراتِ السلبيَّةِ على البيئةِ، والتي قد تنجمُ عن السياراتِ التي تستخدمُ أنواعَ الوقودِ الغنيةَ بالهيدروجينِ؟
2. عند أيِّ قطبٍ في خليَّةِ الوقودِ PEM، يتمُّ إنتاجُ أيوناتِ الهيدروجينِ: الأنودِ أم الكاثودِ؟

القســـم 9-3

الخلايا الإلكتروليتيَّةُ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يقارنُ بينَ الخلايا الإلكتروليتيَّةِ والخلايا الفولتيَّةِ.
- يصفُ عمليَّةَ التحليلِ الكهربائيِّ في تفكُّكِ الماءِ، وفي إنتاجِ الفلزّاتِ.
- يفسِّرُ عمليَّةَ الطلاءِ الكهربائيِّ.
- يصفُ العمليَّةَ الكيميائيَّةَ التي تحدثُ في الخليَّةِ القابلةِ لإعادةِ الشحنِ.

بعضُ تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ لا تحدثُ تلقائيًّا، بل يمكنُ إحداثُها بواسطةِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ. ***إذا كانتِ الطاقةُ الكهربائيَّةُ ضروريَّةً لإنتاجِ تفاعلِ أكسدةٍ-اختزالٍ، ولإحداثِ تغيُّرٍ كيميائيٍّ في خليَّةٍ كهروكيميائيَّةٍ فإن هذه الخليَّةَ تكونُ خليَّةً إلكتروليتيَّةً*** **electrolytic cell**. إن معظمَ الاستخداماتِ التجاريَّةِ لتفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالٍ تستخدمُ الخلايا الإلكتروليتيَّةَ.

كيفَ تعملُ الخلايا الإلكتروليتيَّةُ

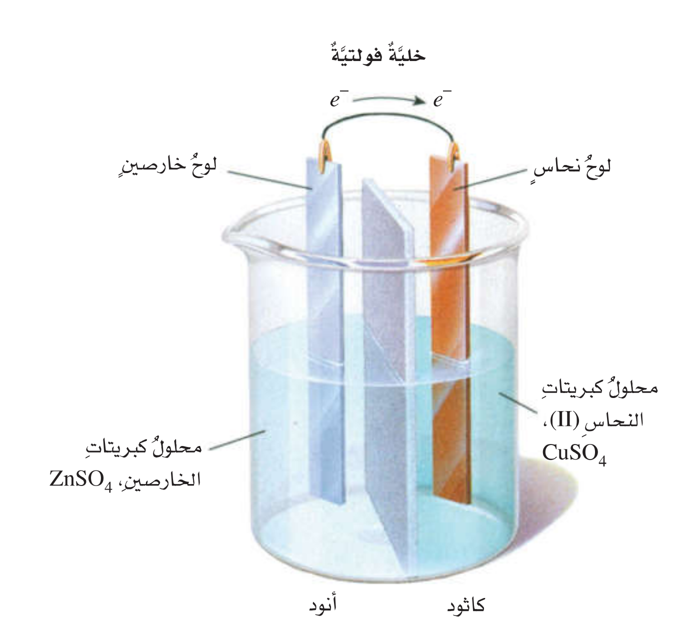
يمكنُ مقارنةُ الخلايا الإلكتروليتيَّةِ والخلايا الفولتيَّةِ من خلالِ الشكلِ 9-13. الخليَّةُ الفولتيَّةُ المبيَّنةُ في الشكلِ لها كاثودٌ من النحاسِ وأنودٌ من الخارصينِ. وإذا تمَّ وصلُها ببطاريَّةٍ، بحيثُ يوصَّلُ طرفُها الموجبُ بقطبِ النحاسِ، وطرفُها السالبُ بقطبِ الخارصينِ، تتحرَّكُ الإلكتروناتُ في الاتجاهِ العكسيِّ. البطاريَّةُ تُرغِمُ الخليَّةَ على عكسِ تفاعلِها. فقطبُ الخارصينِ يصبحُ الكاثودَ، وقطبُ النحاسِ يصبحُ الأنودَ. التفاعلُ النصفيُّ عند الأنودِ، (حيثُ يتأكسدُ فلزُّ النحاسِ)، يمكنُ كتابتُه كالتالي:

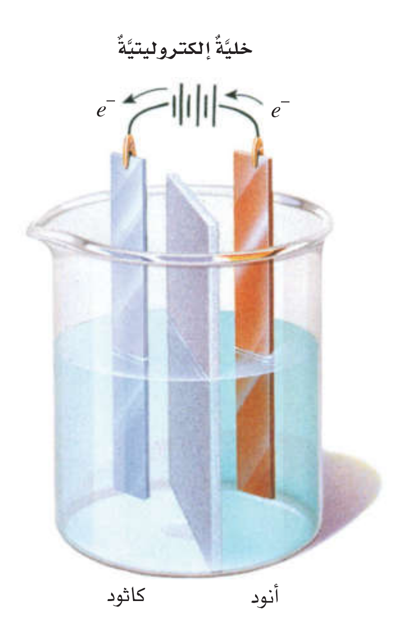
$$\overset{0}{Cu} \rightarrow \overset{+2}{Cu^{2+}} + 2e^-$$

أما التفاعلُ النصفيُّ لاختزالِ الخارصينِ عندَ الكاثودِ، يُكتبُ كالتالي:

$$\overset{+2}{Zn^{2+}} + 2e^- \rightarrow \overset{0}{Zn}$$

الشكل 9-13 ينعكسُ الاتجاهُ الذي تتحرَّكُ فيه الإلكتروناتُ، إذا وُصِلتِ الخليَّةُ الفولتيَّةُ بمصدرِ تيارٍ مباشرٍ، فتصبحُ هذهِ الخليَّةُ خليَّةً إلكتروليتيَّةً.





هناك اختلافان مهمّان بين الخليَّةِ الفولتيَّةِ والخليَّةِ الإلكتروليتيَّةِ.

1. يتصلُ الأنودُ والكاثودُ في خليَّةٍ إلكتروليتيَّةٍ ببطاريَّةٍ أو بمصدرٍ آخرَ لتيّارٍ مباشرٍ، بينما تعملُ الخليَّةُ الفولتيَّةُ كمصدرٍ للطاقةِ الكهربائيَّةِ.
2. الخلايا الإلكتروليتيَّةُ هي الخلايا التي تسبِّبُ فيها الطاقةُ الكهربائيَّةُ، من مصدرٍ خارجيٍّ، حدوثَ تفاعلاتِ أكسدةٍ-اختزالٍ غيرِ تلقائيَّةٍ. أما الخلايا الفولتيَّةُ، فهي الخلايا التي تنتجُ فيها تفاعلاتُ الأكسدةِ-اختزالِ التلقائيَّةُ الكهرباءَ. في الخليَّةِ الإلكتروليتيَّةِ تتحوَّلُ الطاقةُ الكهربائيَّةُ إلى طاقةٍ كيميائيَّةٍ. وفي الخليَّةِ الفولتيَّةِ تتحوَّلُ الطاقةُ الكيميائيَّةُ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ.

الطلاءُ الكهربائيُّ

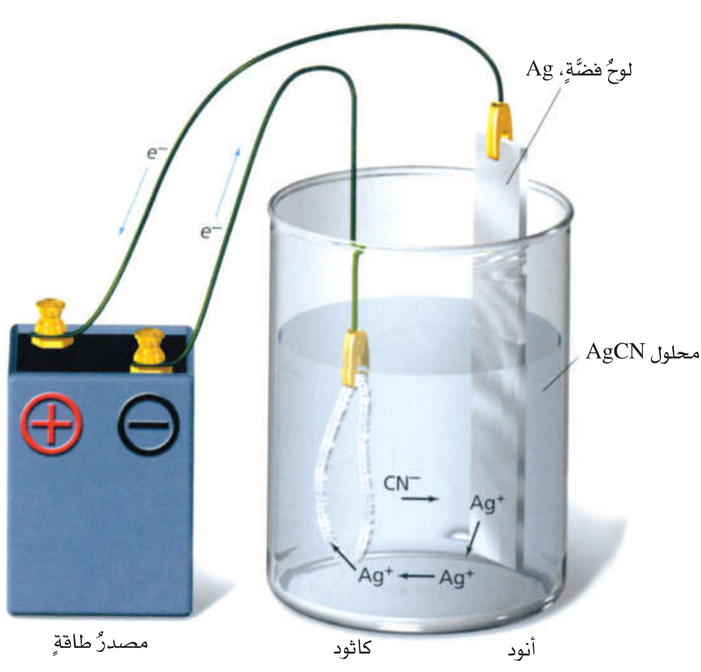
***العمليَّةُ الإلكتروليتيَّةُ التي يُختزلُ فيها أيونٌ فلزيٌّ، ويترسَّبُ خلالَها فلزٌ صلبٌ على سطحٍ معيَّنٍ، تسمَّى الطلاءَ الكهربائيَّ* electroplating**. تحتوي خليَّةُ الطلاءِ الكهربائيِّ على محلولِ ملحٍ لفلزِّ الطلاءِ وعلى الجسمِ المرادِ طلاؤُه (الكاثودِ)، وعلى قطعةٍ من فلزِّ الطلاءِ (الأنودِ). تحتوي خليَّةُ الطلاءِ بالفضَّةِ على محلولِ أحدِ أملاحِ الفضَّةِ قابلٍ للذوبانِ، وأنودٍ من الفضَّةِ. الكاثودُ هو الجسمُ المرادُ طلاؤُه. يوصَّلُ أنودُ الفضَّةِ بالقطبِ الموجبِ لبطاريَّةٍ، أو أيِّ مصدرٍ آخرَ للتيّارِ المباشرِ. يتمُّ توصيلُ الجسمِ المرادِ طلاؤُه بالقطبِ السالبِ. يظهرُ في الشكلِ 9-14 الخليَّةُ التي يتمُّ فيها طلاءُ سوارٍ بالفضَّةِ. تُختزلُ أيوناتُ الفضَّةِ عند الكاثودِ، وفقًا للتفاعلِ النصفيِّ التالي، وتترسَّبُ بشكلِ فلزِّ فضَّةٍ، عندما تمرُّ الإلكتروناتُ عبرَ الدارةِ.

$$\overset{+1}{Ag^+} + e^- \rightarrow \overset{0}{Ag}$$

في هذه الأثناء يتأكسدُ فلزُّ الفضَّةِ عند الأنودِ، وفقًا للتفاعلِ النصفيِّ التالي:

$$\overset{0}{Ag} \rightarrow \overset{+1}{Ag^+} + e^-$$

في الواقعِ يتمُّ نقلُ الفضَّةِ من الأنودِ إلى الكاثودِ في الخليَّةِ.



الشكل 9-14 السوارُ في هذه الخليَّةِ هو الجسمُ المرادُ تغليفُهُ بطبقةٍ رقيقةٍ من الفضَّةِ. عندما يذوبُ أنودُ الفضَّةِ النقيَّةِ، تحلُّ أيوناتُ الفضَّةِ الذائبةِ محلَّ أيوناتِ الفضَّةِ المترسِّبةِ من المحلولِ.

الخلايا القابلةُ لإعادةِ الشحنِ

تقومُ الخليَّةُ القابلةُ لإعادةِ الشحنِ بجمعِ كيمياءِ الأكسدةِ والاختزالِ لكلتا الخليتَيْن: الفولتيَّةِ والإلكتروليتيَّةِ. عندما تحوِّلُ الخليَّةُ القابلةُ لإعادةِ الشحنِ الطاقةَ الكيميائيَّةَ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ، فهي تعملُ كخليَّةٍ فولتيَّةٍ. لكن عندما يُعادُ شحنُها، فهي تعملُ كخليَّةٍ إلكتروليتيَّةٍ محوِّلةً الطاقةَ الكهربائيَّةَ إلى طاقةٍ كيميائيَّةٍ.

بطاريةُ السيارةِ القياسيَّةُ 12 V المبيَّنةُ في الشكل 9-15، هي مجموعةٌ من ستِّ خلايا قابلةٍ لإعادةِ الشحنِ. الأنودُ في كلِّ خليَّةٍ قطعةٌ من الرصاصِ مغمورةٌ في محلولٍ من H_2SO_4. وفيما يلي التفاعلُ النصفيُّ للأنودِ:

$$Pb(s) + SO_4^{2-}(aq) \rightarrow PbSO_4(s) + 2e^-$$

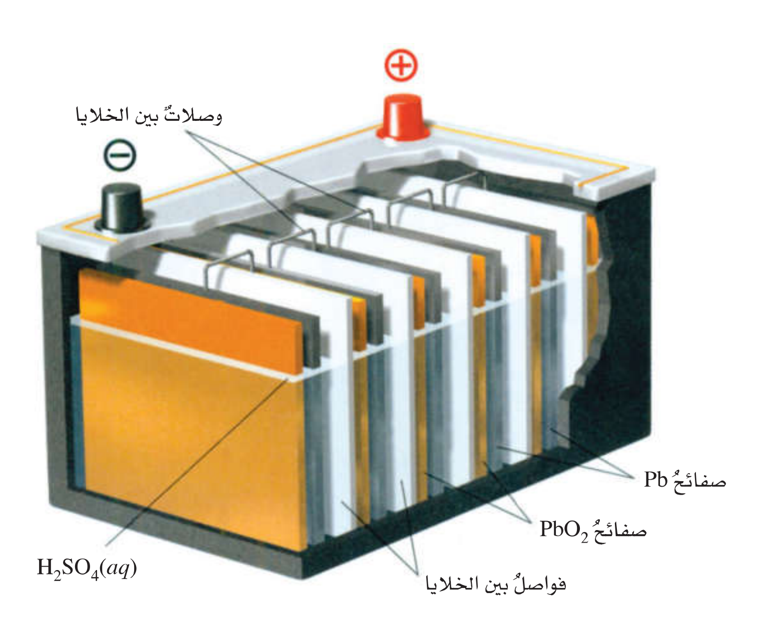
عندَ الكاثودِ، يُختزلُ PbO_2 وفقًا للمعادلةِ التاليةِ:

$$PbO_2(s) + 4H^+(aq) + SO_4^{2-}(aq) + 2e^- \rightarrow PbSO_4(s) + 2H_2O(l)$$

تفاعلُ الأكسدةِ-اختزالِ النهائيِّ لدورةِ التفريغِ هو:

$$Pb(s) + PbO_2(s) + 2H_2SO_4(aq) \rightarrow 2PbSO_4(s) + 2H_2O(l)$$

تُنتجُ بطاريَّةُ السيارةِ الطاقةَ الكهربائيَّةَ الضروريَّةَ لانطلاقِ محرِّكِها. حمضُ الكبريتيكِ، الموجودُ بشكلٍ متأيِّنٍ، يتمُّ استهلاكُه، بينما تتجمَّعُ كبريتاتُ الرصاصِ (II) بشكلِ مسحوقٍ أبيضَ على القطبَيْنِ. وما أن تنطلقَ السيارةُ، حتى تنعكسَ التفاعلاتُ النصفيَّةُ، تحت تأثيرِ الفولتيَّةِ التي ينتجُها المولِّدُ، ويعادُ إنتاجُ Pb، PbO_2، H_2SO_4. يمكنُ إعادةُ شحنِ بطاريَّةٍ ما دامتْ جميعُ المتفاعلاتِ الضروريَّةِ للتفاعلِ الإلكتروليتيِّ موجودةً، وجميعُ التفاعلاتِ قابلةً للانعكاسِ.



الشكل 9-15 تقومُ الخلايا القابلةُ لإعادةِ الشحنِ في بطاريَّةِ السيارةِ بإنتاجِ الكهرباءِ من التفاعلاتِ بينَ أكسيدِ الرصاصِ (IV)، والرصاصِ، وحمضِ الكبريتيكِ.

التحليلُ الكهربائيُّ

الطلاءُ الكهربائيُّ وإعادةُ شحنِ البطاريَّةِ مثالان على التحليلِ الكهربائيِّ. **التحليلُ الكهربائيُّ electrolysis** هو ***عمليَّةُ إمرارِ التيّارِ عبرَ خليَّةٍ يكونُ جهدُ الخليَّةِ فيها سالبًا وتسبِّبُ حدوثَ تفاعلِ أكسدةٍ واختزالٍ.*** والواقعُ أن الطاقةَ الكهربائيَّةَ تُستخدمُ هنا لإحداثِ تفاعلٍ كيميائيٍّ غيرِ تلقائيٍّ. لكي يحدثَ تفاعلُ الخليَّةِ هذا يجبُ أن تكونَ الفولتيَّةُ الخارجيَّةُ (أي الطاقةُ الكهربائيَّةُ الخارجيَّةُ) أكبرَ من الجهدِ الذي يمكنُ أن ينتجُه تفاعلُ الخليَّةِ التلقائيُّ العكسيُّ.

يكتسبُ التحليلُ الكهربائيُّ أهميَّةً صناعيَّةً كبيرةً. فهو يُستخدمُ لتنقيةِ فلزّاتٍ كثيرةٍ من الخاماتِ، حيثُ تكونُ متَّحدةً كيميائيًّا مع موادَّ أخرى في القشرةِ الأرضيَّةِ.

التحليلُ الكهربائيُّ للماءِ

التحليلُ الكهربائيُّ للماءِ، المبيّنُ في الشكل 9-16، يؤدّي إلى تفاعلِ الخليَّةِ الذي يتفكَّكُ خلالَه الماءُ إلى عنصرَيْه H_2 و O_2. تذكَّرْ أن غازَ الهيدروجين وغازَ الأكسجين يتّحدان تلقائيًّا ليكوِّنا الماءَ. وهما يُستخدمان لتشغيلِ خلايا الوقودِ التي تنتجُ الكهرباءَ. لذلك تكونُ العمليَّةُ العكسيَّةُ (التحليلُ الكهربائيُّ للماءِ) غيرَ تلقائيَّةٍ، وتتطلَّبُ طاقةً كهربائيَّةً. التفاعلاتُ النصفيَّةُ التاليةُ تحدثُ عند الأنودِ والكاثودِ.

أنود: $6H_2O(l) \rightarrow 4e^- + O_2(g) + 4H_3O^+(aq)$

كاثود: $4H_2O(l) + 4e^- \rightarrow 2H_2(g) + 4OH^-(aq)$

الشكل 9-16 تُستخدمُ طاقةُ البطاريَّةِ الكهربائيَّةُ لتفكيكِ الماءِ. يتكوَّنُ الهيدروجينُ عند الكاثودِ، والأكسجينُ عندَ الأنودِ.

إنتاجُ الألمنيوم بالتحليلِ الكهربائيِّ

الألمنيومُ هو الفلزُّ الأكثرُ وفرةً في القشرةِ الأرضيَّةِ. وهو نسبيًّا فلزٌّ نشطٌ. لذلك يوجدُ في الطبيعةِ على شكلِ أكسيدٍ في خامٍ يُسمّى البوكسيتَ. الألمنيومُ حاليًّا له فوائدُ جمَّةٌ على الصعيدِ التجاريِّ. لكنه لم يكنْ كذلك حتى اكتشافِ طريقةِ استخلاصِه عامَ 1886 بفضلِ شارل م. هول من الولاياتِ المتحدةِ وبول هيرولت من فرنسا، بشكلٍ متزامنٍ ومستقل، وذلك بالتحليلِ الكهربائيِّ في عمليَّةٍ تُسمّى عمليَّةَ هول–هيرولت.

لا يحتوي خامُ البوكسيتِ على أكسيدِ الألمنيوم Al_2O_3 فحسبُ، بل على أكاسيدِ الحديد والسيليكون والتيتانيوم. لذلك يجبُ أولاً فصلُ أكسيدِ الألمنيوم (الألومينا) عن المركَّباتِ الأخرى في المادَّةِ الخام. يتمُّ الحصولُ على الألومينا المائيَّةِ النقيَّةِ $(Al_2O_3 \cdot nH_2O)$ بمعالجةِ البوكسيتِ بهيدروكسيدِ الصوديوم الذي يتفاعلُ مع الألومينا، لكنهُ لا يتفاعلُ مع المركَّباتِ الأخرى في الخام. بعد ذلك يُفصلُ محلولُ الألومينا عن باقي المركَّباتِ الصلبةِ، ويرسَّبُ للحصولِ على الألومينا النقيَّةِ. تُذابُ الألومينا النقيَّةُ في الكريوليتِ المصهورِ Na_3AlF_6 عندَ درجةِ حرارةٍ $970°C$، في خليَّةٍ إلكتروليتيَّةٍ، حيث تُختزلُ أيوناتُ الألمنيوم إلى فلزِّ الألمنيوم. مصهورُ الألمنيوم أكثفُ من الكريوليتِ والألومينا المنصهرَيْن، لذلك يترسَّبُ فلزُّ الألمنيوم المنصهرُ إلى أسفلِ الخليَّةِ، حيث يتمُّ سحبُه بشكلٍ دوريٍّ.

يحتوي المصهورُ الإلكتروليتيُّ على عددٍ كبيرٍ من الأنواعِ المحتويةِ على الألمنيوم. مع العلمِ أن كيمياءَ التفاعلِ الكهروكيميائيِّ ليستْ مفهومةً بشكلٍ تامٍّ. لا يزالُ العلماءُ يناقشونَ حقيقةَ الأنواعِ المشاركةِ في التفاعلاتِ النصفيَّةِ، لكن التفاعلَ العامَّ هو:

$$2Al_2O_3(l) + 3C(s) \rightarrow 4Al(l) + 3CO_2(g)$$

حيثُ الكربونُ هو الأنودُ، والفولاذُ هو الكاثودُ في الخليَّةِ.

فلزُّ الألمنيومِ المُنتجُ خلالَ هذه العمليَّةِ نقيٌّ بنسبةِ 99.5%. وعمليَّةُ هول-هيرولت هذه تجعلُ إنتاجَ الألمنيومِ مقبولاً اقتصاديًّا. لكنَّ هذه العمليَّةَ تستهلكُ الكثيرَ من الطاقةِ الكهربائيَّةِ. ونظرًا لتوفُّرِ هذه الطاقةِ بدولةِ الإماراتِ العربيَّةِ المتَّحدةِ، يتمُّ إنتاجُ الألمنيوم بهذه الطريقةِ في مصنعِ «دوبال» (Dubal)، المبيَّن في الشكلِ 9-17، والذي يقعُ بجبلِ عليٍّ بإمارةِ دبيَّ، وتبلغُ طاقتُه الإنتاجيَّةُ السنويَّةُ قرابةَ 920 ألفَ طن للعامِ 2007.

الكيمياءُ تطبيقيًّا

إنتاجُ الصوديوم بالتحليلِ الكهربائيِّ

الصوديومُ هو ذلك الفلزُّ النشطُ الذي يشكِّلُ تحضيرُه، عبرَ عمليَّةٍ كيميائيَّةٍ، خطرًا. يُنتجُ الصوديومُ، اليوم، بشكلٍ رئيسٍ بواسطةِ التحليلِ الكهربائيِّ لكلوريدِ الصوديومِ المصهورِ. تبلغُ درجةُ الانصهارِ لكلوريدِ الصوديوم حوالي 800°C. لكن بمزجِه مع كلوريدِ الكالسيوم تنخفضُ درجةُ انصهارِه إلى حوالي 600°C. هذا المزيجُ يتمُّ إدخالُه إلى خليَّةٍ إلكتروليتيَّةٍ تُسمَّى خليَّةَ داون، لإنتاجِ فلزِّ الصوديومِ. وتسمحُ درجةُ الانصهارِ المنخفضةُ للخليَّةِ باستخدامِ كميَّةٍ أقلَّ من الطاقةِ الكهربائيَّةِ.

الشكل 9-17 مصنعُ «دوبال» بجبلِ عليٍّ لصنعِ الألمنيومِ.

مراجعةُ القسم 9-3

1. صفْ خليَّةً إلكتروليتيَّةً.
2. صف عمليَّةَ الطلاءِ الكهربائيِّ.
3. ما الخليَّةُ القابلةُ لإعادةِ الشحنِ؟
4. أعطِ مثالاً على كيفيَّةِ استخدامِ الخلايا الإلكتروليتيَّةِ في الصناعةِ.

تفكيرٌ ناقد

5. **تطبيق مفاهيم:** يحتوي خامُ النحاسِ على فلزِّ الخارصينِ الذي يتأكسدُ مع Cu، خلالَ عمليَّةِ التنقيةِ الإلكتروليتيَّةِ. مع ذلك، فإن أيوناتِ Zn^{2+} لا تُختزلُ فيما بعدُ، حين تُختزلُ أيوناتُ Cu^{2+} إلى Cu عندَ الكاثودِ، للحصولِ على فلزِّ النحاسِ النقيِّ. فسِّرْ كيفَ يُمكنُ لـ Zn أن يتأكسدَ مع Cu، لكن أيوناتِهما لا تُختزلُ معًا.

مراجعةُ الفصل 9

ملخّصُ الفصل

1-9

- الكيمياءُ الكهربائيَّةُ فرعٌ من الكيمياءِ يتعاملُ مع تطبيقاتِ تفاعلاتِ الأكسدةِ-اختزالِ المرتبطةِ بالكهرباءِ.
- القطبُ المغمورُ في محلولِ إلكتروليتٍ هو نصفُ خليَّةٍ.
- الأنودُ هو القطبُ الذي تحدثُ عندَه الأكسدةُ، والكاثودُ هو القطبُ الذي يحدثُ عندَه الاختزالُ.
- تتألَّفُ الخليَّةُ من قطبَين موصولَين بسلكٍ تنتقلُ عبرَه الإلكتروناتُ، وبقنطرةٍ ملحيَّةٍ (أو حاجزٍ مساميٍّ) تنتقلُ عبرَها الأيوناتُ لوزنِ الشحنةِ.
- الخليَّةُ الكهروكيميائيَّةُ نظامٌ من أقطابٍ وإلكتروليتاتٍ تُنتِجُ فيها التفاعلاتُ الكيميائيَّةُ طاقةً كهربائيَّةً، أو يُنتِجُ فيها التيّارُ الكهربائيُّ تغيُّرًا كيميائيًّا.

المفردات

الكيمياءُ الكهربائيَّةُ electrochemistry (235)
القطب electrode (236)
نصفُ خليَّةٍ half-cell (236)
الأنود anode (236)
الكاثود cathode (236)

2-9

- الخليَّةُ الفولتيَّةُ، وتسمّى أيضًا الخليَّةُ الجلفانيَّةُ، تستخدمُ تفاعلَ الأكسدةِ-اختزالِ التلقائيَّ لإنتاجِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ. البطارياتُ وخلايا الوقودِ أمثلةٌ على الخلايا الفولتيَّةِ.
- خلايا الوقودِ خلايا فولتيَّةٌ يتمُّ فيها تزويدُ المتفاعلاتِ وإزالةُ النواتجِ باستمرارٍ.
- يجبُ قياسُ فرقِ الجهدِ عبرَ خليَّةٍ كاملةٍ، لأن من غيرِ الممكنِ حدوثَ انتقالِ إلكتروناتٍ إلاَّ إذا تمَّ توصيلُ الأنودِ بالكاثودِ ليكوِّنا دارةً كاملةً. هكذا يُقاسُ جهدُ القطبِ القياسيُّ لنصفِ خليَّةٍ بالنسبةِ إلى قطبِ الهيدروجينِ القياسيِّ SHE.
- جهودُ الاختزالِ القياسيَّةُ، E^0، تُعرضُ بشكلِ تفاعلاتٍ نصفيَّةٍ للاختزالِ. العواملُ المؤكسدةُ القويَّةُ لها قيمُ E^0 موجبةٌ، في حين أن العواملَ المختزلةَ القويَّةَ لها قيمُ E^0 سالبةٌ.
- قيمةُ $E^0_{\text{خلية}}$ للخليَّةِ الفولتيَّةِ موجبةٌ.
- يحدثُ التآكلُ (الصدأُ) عندما يتعرَّضُ الحديدُ للأكسجينِ والماءِ. إحدى أفضلِ الطرقِ لمنعِ التآكلِ هي استخدامُ الحمايةِ الكاثوديَّةِ.

المفردات

الخليَّةُ الفولتيَّةُ voltaic cell (238)
الجهدُ الكهربائيُّ electric potential (242)
جهدُ الاختزالِ reduction potential (242)
جهدُ القطبِ electrode potential (242)
جهدُ القطبِ القياسيُّ standard electrode potential (243)

3-9

- الخلايا الإلكتروليتيَّةُ هي خلايا تزوَّدُ بطاقةٍ كهربائيَّةٍ من مصدرٍ خارجيٍّ، تحدثُ تفاعلاً غيرَ تلقائيٍّ.
- قيمةُ $E^0_{\text{خلية}}$ للخليَّةِ الإلكتروليتيَّةِ سالبةٌ.
- للتحليلِ الكهربائيِّ تأثيرٌ اقتصاديٌّ كبيرٌ. تطبيقاتُ الخلايا الإلكتروليتيَّةِ، هي: الطلاءُ الكهربائيُّ للأسطحِ المعدنيَّةِ، البطاريّاتُ القابلةُ لإعادةِ الشحنِ، إنتاجُ الألمنيومِ، تنقيةُ الفلزّاتِ.

المفردات

الخليَّةُ الإلكتروليتيَّةُ electrolytic cell (247)
الطلاءُ الكهربائيُّ electroplating (248)
التحليلُ الكهربائيُّ electrolysis (250)

اختيارٌ من متعدِّد

1. القطبُ الذي يحدثُ عندَه اختزالٌ هو

أ. الأنُودُ. ج. إما الأنودُ وإما الكاثودُ.

ب. الكاثودُ. د. الخليَّةُ النصفيَّةُ.

2. ارجعْ إلى جدولِ جهودِ الاختزالِ القياسيَّةِ في الأسفلِ. تحتوي خليَّةٌ فولتيَّةٌ على لوحٍ من فلزِّ الخارصين في محلول من أيوناتِ الخارصين، في واحدةٍ من الخلايا النصفيَّةِ. في الخليَّةِ النصفيَّةِ الأخرى يوجدُ لوحٌ من فلزِّ القصدير في محلولٍ من أيوناتِ القصدير. عندَما تعملُ هذه الخليَّةُ

أ. يتأكسدُ Sn و يُختزلُ Zn^{2+}.

ب. يُختزلُ Sn و يتأكسدُ Zn^{2+}.

ج. يتأكسدُ Sn^{2+} و يُختزلُ Zn.

د. يُختزلُ Sn^{2+} و يتأكسدُ Zn.

3. عندما يُعادُ شحنُ خليَّةٍ قابلةٍ لإعادةِ الشحنِ، تعملُ الخليَّةُ كخليَّة

أ. وقودٍ. ج. فولتيَّةٍ.

ب. إلكتروليتيَّةٍ. د. قلويَّةٍ.

4. ارجعْ إلى جدولِ جهودِ الاختزالِ القياسيَّةِ في الأسفلِ. الجهدُ القياسيُّ للخليَّةِ $Sn|Sn^{2+}||Cr^{3+}|Cr$ هو -0.60 V. ما جهدُ الاختزالِ القياسيُّ للقطبِ Cr^{3+}/Cr؟

أ. $+0.88$ V ج. -0.88 V

ب. $+0.74$ V د. -0.74 V

تفاعلُ نصفِ الخليَّة	جهدُ الاختزالِ القياسيِّ، E^0 (بالفولت)
$Au^{3+} + 3e^- \rightleftarrows Au$	+1.50
$Cu^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Cu$	+0.34
$Fe^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Fe$	−0.41
$Sn^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Sn$	−0.14
$Zn^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Zn$	−0.76
$Mg^{2+} + 2e^- \rightleftarrows Mg$	−2.37

5. ارجعْ إلى جدولِ جهودِ الاختزالِ القياسيَّةِ في الأعلى. أيُّ الفلزَّين: Zn أم Au يمكنُ أن يختزلَ الأيوناتِ Sn^{2+} إلى الفلزِّ Sn، عندما يوضعُ في المحلولِ المائيِّ لأيوناتِ Sn^{2+}؟

أ. Zn

ب. Au

ج. كلا الفلزَّيْن، Zn أو Au يستطيعان اختزالَ الأيوناتِ Sn^{2+}

د. لا يستطيعُ أيٌّ من الفلزَّيْن Zn و Au اختزالَ الأيوناتِ Sn^{2+}

6. عندَما يتمُّ طلاءُ فلزٍّ معيَّنٍ بفلزِّ الفضَّةِ، فإن Ag^+

أ. يتأكسدُ عند الأنودِ. ج. يتأكسدُ عند الكاثودِ.

ب. يُختزلُ عند الأنودِ. د. يُختزلُ عند الكاثودِ.

7. أيُّ فلزٍّ يوفِّرُ لجسرٍ حديديٍّ أفضلَ حمايةٍ كاثوديَّةٍ من التآكلِ؟

أ. Au ج. Cu

ب. Sn د. Mg

مراجعةُ المفاهيم

8. ما القطبُ في نصفِ الخليَّةِ $Zn^{2+}(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$؟ وهل التفاعلُ النصفيُّ هذا هو تفاعلٌ أنوديٌّ أم تفاعلٌ كاثوديٌّ؟

9. ما دورُ الحاجزِ المساميِّ؟

10. اكتبِ التفاعلَ النهائيَّ وترميزَ الخليَّةِ لكلٍّ من أزواجِ أنصافِ الخلايا التاليةِ. افترضْ أن أولَ نصفِ خليَّةٍ مُعطى في كلِّ زوجٍ هو نصفُ الخليَّةِ الأنوديُّ.

أ. Co^{2+}/Co، Ag^+/Ag

ب. Zn^{2+}/Zn، Au^{3+}/Au

ج. K^+/K، Hg^{2+}/Hg

11. صفْ مكوِّناتِ خليَّةٍ كهروكيميائيَّةٍ وكيف تتحرَّكُ الشحنةُ الكهربائيَّةُ عبرَ هذه المكوِّناتِ.

12. صفْ خليَّةً فولتيَّةً، وهاتِ مثالَين عليها.

13. ما الميزةُ الأساسيَّةُ لخليةِ الوقودِ على البطارياتِ في توليدِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ؟

14. فسِّرْ لماذا يعُدُّ التآكلُ خليَّةً فولتيَّةً؟

15. ناقشْ فوائدَ طرقِ منعِ التآكلِ ومساوئَها.

16. أيُّ تفاعلٍ نصفيٍّ هو أكثرُ احتمالاً لأن يكونَ تفاعلَ أكسدةٍ: تفاعلٌ له جهدُ اختزالٍ قياسيٌّ من -0.42 V، أم تفاعلٌ له جهدُ اختزالٍ قياسيٌّ من $+0.42$ V؟

17. لماذا تُسمَّى بطارياتُ الخليَّةِ الجافَّةِ بالخلايا الجافَّةِ، رغمَ أنَّ كيمياءَ هذه البطاريّاتِ تتضمَّنُ الماءَ؟

18. أ. فسِّرِ المقصودَ بفرقِ الجهدِ بين قطبَين في خليَّةٍ فولتيَّةٍ.
ب. كيفَ يقاسُ فرقُ الجهدِ؟ ما الوحداتُ المستخدمةُ؟

19. يعيَّنُ لقطبِ الهيدروجينِ القياسيِّ جهدُ قطبٍ من 0.00 V. فسِّرْ لماذا عُيِّنَتْ هذه الفولتيَّةُ؟

20. أ. ما المعلومةُ التي يوفِّرُها جهدُ الاختزالِ القياسيُّ لنصفِ خليَّةٍ معيَّنٍ؟
ب. علامَ تشيرُ قيمةُ جهدِ الاختزالِ النسبيَّةُ لنصفِ تفاعلٍ معيَّنٍ حولَ ميلِ التفاعلِ إلى الأكسدةِ والاختزالِ؟

21. ماذا تلاحظُ عندما تبدأُ الخليَّةُ التاليةُ بالعمل؟

$$Ba(s) \mid Ba^{2+}(aq) \parallel Sn^{2+}(aq) \mid Sn(s)$$

22. أيُّ تفاعلٍ يحدثُ عندَ الكاثودِ في عمليَّةِ تحليلٍ كهربائيٍّ؟

23. فسِّرْ لماذا لا يمكنُ استخدامُ الماءِ في الخليَّةِ الإلكتروليتيَّةِ خلالَ إنتاجِ الألمنيوم.

24. احسبْ فولتيَّةَ الخليَّةِ التي يكونُ فيها التفاعلُ النهائيُّ هو التحليلُ الكهربائيُّ لمحلولِ كلوريدِ الكادميوم إلى عناصره.

25. وفقًا للبياناتِ الكهروكيميائيَّةِ هل يمكنُ طلاءُ جسمٍ من فلزِّ الخارصينِ بـ Ni، باستخدامِ محلولِ نيتراتِ النيكل؟ فسِّرْ ذلك.

26. ميِّزْ بين الخليَّةِ الفولتيَّةِ والخليَّةِ الإلكتروليتيَّةِ من حيثُ طبيعةُ التفاعلِ النهائيِّ.

27. أ. ما الطلاءُ الكهربائيُّ؟
ب. حدِّدْ هويَّةَ الأنودِ والكاثودِ في مثلِ هذه العمليَّةِ.

مسائل

28. حدِّدْ لكلٍّ من أزواجِ أنصافِ الخلايا التالية، التفاعلَ النهائيَّ الذي يحدثُ تلقائيًّا:
أ. Na^+/Na ،Ni^{2+}/Ni
ب. F_2/F^- ،S/H_2S
ج. Br_2/Br^- ،Cr^{3+}/Cr
د. MnO_4^-/Mn^{2+} ،Co^{2+}/Co

29. حدِّدْ قيمةَ E^0 للخلايا الواردةِ في التمرينِ السابق.

30. افرضْ أن كيميائيِّين اختاروا أن يكونَ نصفُ الخليَّةِ $I_2 + 2e^- \rightarrow 2I^-$ هو القطبُ القياسيُّ، وعيَّنوا له جهدًا قيمتُه صفرُ فولت.
أ. كم ستكونُ قيمةُ E^0 لنصفِ الخليَّةِ $Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$؟
ب. كم ستكونُ قيمةُ E^0 لنصفِ الخليَّةِ $Al^{3+} + 3e^- \rightarrow Al$؟
ج. كم سيكونُ التغيُّرُ الملاحظُ في قيمةِ E^0 للتفاعلِ الذي يتضمَّنُ $Br_2 + I^-$، إذا كانَ نصفُ الخليَّةِ I_2 هو القياسيُّ؟

31. إذا غُمرَ لوحٌ من Ni في محلولٍ من $AgNO_3$، فما المتوقَّعُ أن يحدثَ؟ علِّلْ ذلك، مستخدمًا قيمَ E^0 والمعادلاتِ.

مراجعةٌ متنوِّعة

32. توقَّعْ إن كانَ كلٌّ من التفاعلاتِ التاليةِ سيحدثُ تلقائيًّا، كما هو مكتوبٌ، وذلك بتحديدِ قيمةِ E^0 لجهدِ التفاعلِ. اكتبْ وزنَ المعادلةِ العامَّةِ، لكلِّ تفاعلٍ يحدثُ تلقائيًّا.
أ. $Mg + Sn^{2+} \rightarrow$
ب. $K + Al^{3+} \rightarrow$
ج. $Li^+ + Zn \rightarrow$
د. $Cu + Cl_2 \rightarrow$

33. لماذا يمكنُ أن تكونَ البطاريّاتُ القلويَّةُ أصغرَ من خلايا الخارصينِ–الكربونِ الجافَّةِ؟

34. ارسمْ خليَّةً فولتيَّةً تتألَّفُ من نصفَيْن هما: Ag في $AgNO_3$ و Ni في $NiSO_4$. حدِّدِ الأنودَ والكاثودَ، وبيِّنِ الاتجاهاتِ التي تتحرَّكُ فيها الإلكتروناتُ والأيوناتُ على الرسمِ.

35. هل يمكنُ تخزينُ محلولٍ من $Sn(NO_3)_2$ في وعاءٍ من الألمنيوم؟ فسِّرْ ذلك، مستخدمًا قيمَ E^0.

36. خليَّةٌ فولتيَّةٌ مكوَّنةٌ من قطبٍ من الكادميوم في محلولٍ من $CdSO_4$، وقطبٍ من الخارصينِ في محلولٍ من $ZnSO_4$. نصفا الخليتَيْن مفصولان بحاجزٍ مساميٍّ.
أ. أيُّهما الكاثودُ وأيُّهما الأنودُ؟
ب. في أيِّ اتجاهٍ تتحرَّكُ الإلكتروناتُ؟
ج. اكتبِ المعادلاتِ الموزونةَ للتفاعلَيْنِ النصفيَّيْن، واكتبِ المعادلةَ النهائيَّةَ للتفاعلِ.

37. هل يصلحُ القطبانِ التاليانِ لصناعةِ بطاريةٍ جيِّدةٍ؟ علِّلْ ذلك.

$$Cd \rightarrow Cd^{2+} + 2e^-$$

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$$

38. أ. ماذا سيحدثُ إذا استخدمْتَ ملعقةً من الألمنيومِ لتحريكِ محلولٍ من $Zn(NO_3)_2$؟

ب. هل يمكنُ استخدامُ لوحٍ من Zn لتحريكِ محلولٍ من $Al(NO_3)_3$؟ فسِّرْ ذلك، مستخدمًا قيمَ E^0.

39. اكتبْ تفاعلاتِ كلٍّ من الأنودِ والكاثودِ لكلٍّ من أنواعِ البطاريّاتِ التاليةِ؟

أ. كربون–خارصين

ب. قلويَّة

ج. زئبق

40. أ. لماذا تكونُ بعضُ جهودِ الاختزالِ القياسيَّةِ موجبةً وبعضُها سالبًا؟

ب. قارنْ قيمةَ E^0 لفلزٍّ مع نشاطيَّتِه.

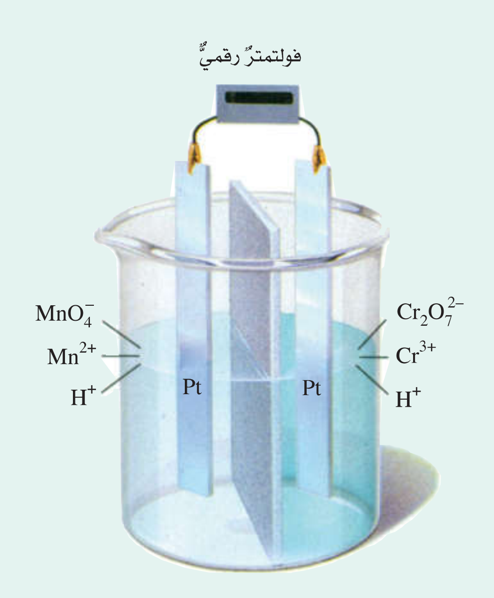
تفكيرٌ ناقد

41. تطبيقُ نماذج: وضِّحْ كيفَ جُمعَتْ كيمياءُ الأكسدةِ والاختزالِ لكلتا الخليَّتَين، الفولتيَّةِ والإلكتروليتيَّةِ، في كيمياءِ الخلايا القابلةِ لإعادةِ الشحنِ.

42. تطبيقُ أفكار: في المركمِ الرصاصيِّ، مثلِ بطاريَّةِ سيارتِك، يمكنُ تحديدُ درجةِ تفريغِ البطاريَّةِ بأن تُقاسَ كثافةُ سائلِ البطاريَّةِ. وضِّحْ كيف يمكنُ ذلك.

43. تطبيقُ أفكار: في بطارياتِ المركمِ الرصاصيِّ، لا يمكنُ إعادةُ شحنِ البطاريَّةِ بشكلٍ غيرِ محدودٍ. علِّلْ ذلك.

44. تفسيرُ صورٍ بيانية: في الأسفلِ صورةٌ لخليَّةٍ فولتيَّةٍ. حدِّدْ هويَّةَ المادَّةِ التي تتأكسدُ إذا سُمحَ للتيارِ بأن يمرَّ.



بحثٌ وكتابة

45. اذهبْ إلى المكتبةِ وتعرّفِ الطلاءَ الكهربائيَّ في الصناعةِ. ما الفلزّاتُ الرئيسةُ الثلاثةُ المستخدمةُ في الطلاءِ؟ كم طنًّا متريًّا يستخدمُ من كلٍّ منها للطلاءِ الكهربائيِّ كلَّ سنةٍ في العالمِ؟ واكتبْ تقريرًا عن ذلك.

46. ابحثْ في أنواعِ البطاريّاتِ المصمَّمةِ للسياراتِ الكهربائيَّةِ. اكتبْ تقريرًا عن فوائدِ هذه الأنواعِ من البطاريّاتِ ومساوئِها.

تقويمٌ بديل

47. أداء: قمْ بجردةٍ للبطارياتِ المستخدمةِ في منزلك. جدِ الفولتيَّةَ التي زوِّدَت بها كلُّ بطاريَّةٍ، وكذلك التفاعلَ الكيميائيَّ الكهربائيَّ المستخدمَ في كلٍّ منها. اقترحْ سببَ استخدامِ هذا التفاعلِ الكهروكيميائيِّ بالتحديدِ، في كلِّ حالةٍ.

48. إذا حصلَ تلامسٌ بين حشوةٍ فضِّيَّةٍ لسنٍّ أحدِ الأشخاصِ وبقيَّةِ ورقةِ ألمنيوم على حبَّةِ سكاكرَ، يعملُ اللعابُ كإلكتروليتٍ وتتشكَّلُ خليَّةٌ كهروكيميائيَّةٌ تنتجُ لمعةَ ألمٍ خفيفةً. فسِّرْ ما يحدثُ مستخدمًا تفاعلاتِ أنصافِ الخلايا وقيمَ E^0.

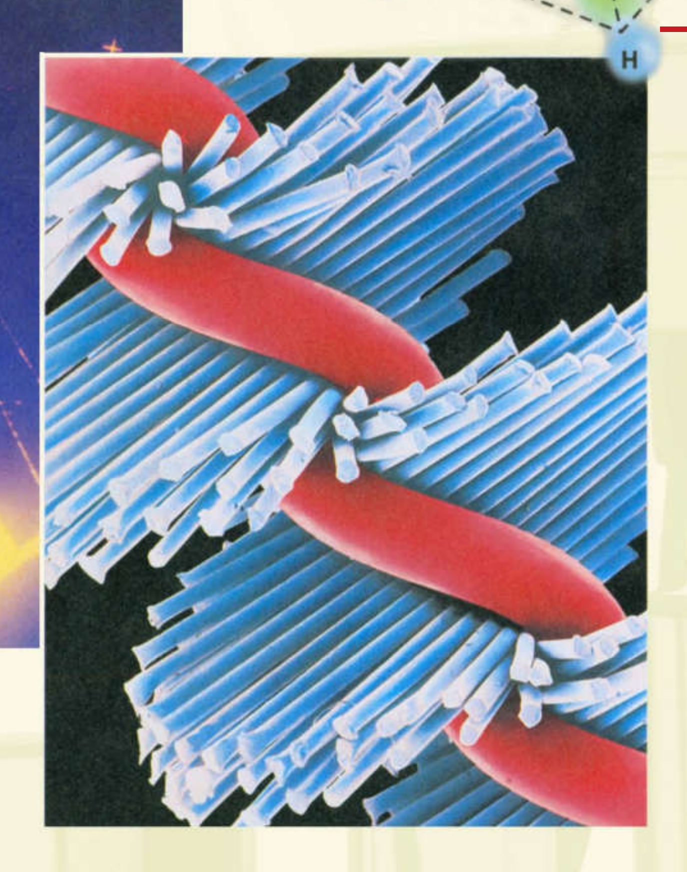
مشروعٌ علميٌّ

49. استقصاءُ جودةِ البطاريّاتِ التجاريَّةِ الموجودةِ في الأسواقِ.

الوحدة

3

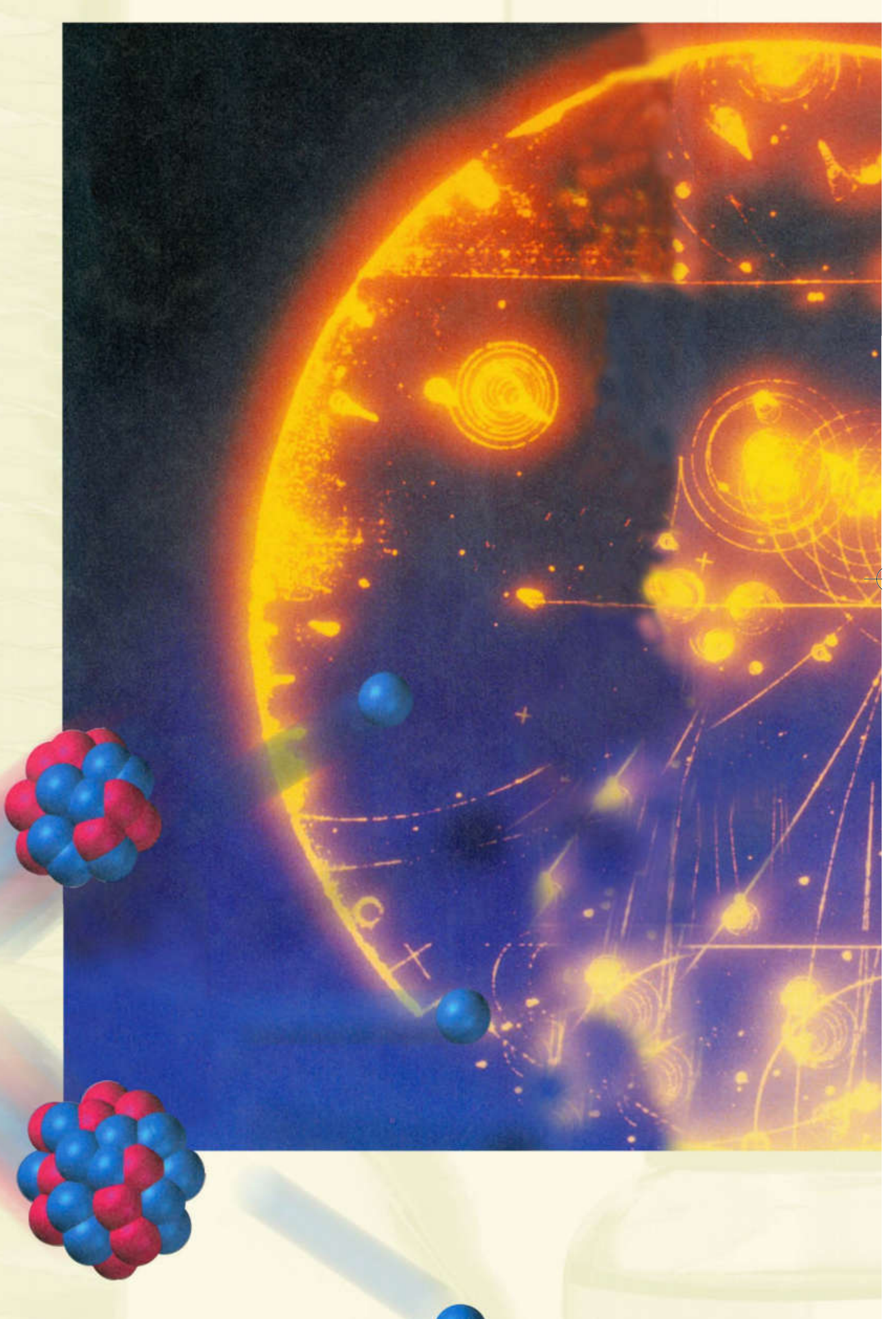
الكيمياءُ العضويَّةُ والنوويَّةُ



الفصول

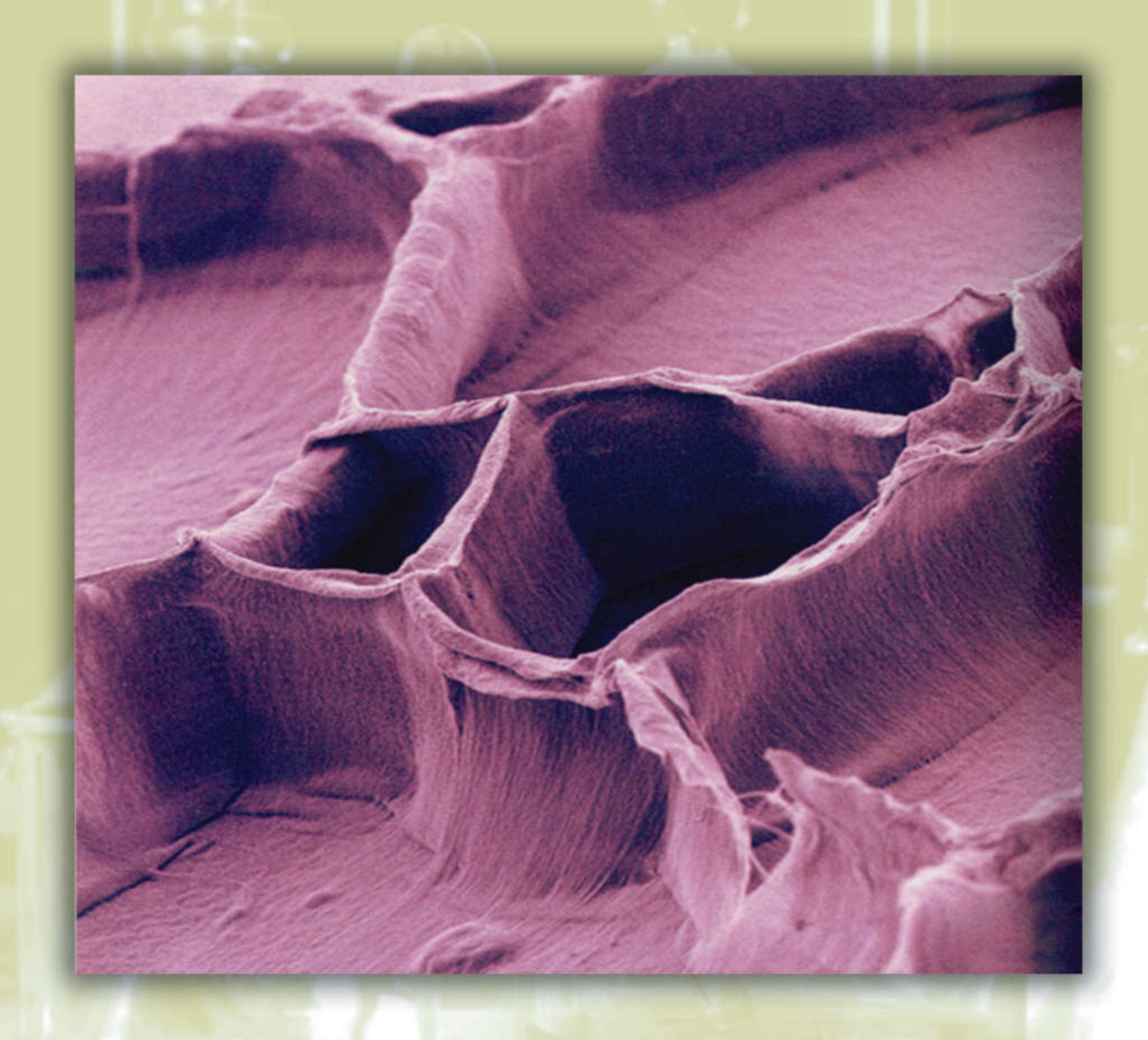
والقرآنُ منهلاً للعلمِ

لا يزالُ الإنسانُ منذُ نزولِ القرآنِ الكريمِ على رسولِ اللهِ (ص)، يكتشفُ عجائبَ القرآنِ وإعجازَه العلميَّ على مرِّ العصورِ. وبعد أن توصَّلَ الإنسانُ علميًّا إلى بعضِ من حقائقِ الكونِ حولَ حركةِ كلِّ شيءٍ في الوجودِ، أدركَ أن القرآنَ الكريمَ قد أشارَ إليها في آياتِه البيِّناتِ، كقولِه تعالى: «لا الشَّمْسُ يَنْبغِي لَها أنْ تُدْرِكَ الْقَمَرَ ولا الَّليْلُ سَابِقُ النَّهارِ وَكُلٌّ في فَلَكٍ يَسْبَحُونَ» سورة يس، آية 40.



الفصل 10

الكربونُ والهيدروكربوناتُ



nanotubes هي عبارةٌ عن أسطواناتٍ جوفاءَ من الكربونِ النقيِّ، سمكُها أرفعُ بآلافِ المرّاتِ من شعرةِ الإنسانِ، وأقوى بعشراتِ المرّات من الفولاذِ المماثلِ لها بالوزن.

القسم 1-10

وجودُ الكربونِ وأهميّتُه

مؤشّراتُ الأداءِ

- يربطُ بينَ قدرةِ ذرَّةِ الكربونِ لتكوينِ روابطَ تساهميَّةٍ وتركيبِها الإلكترونيِّ والأفلاكِ المهجَّنةِ.
- يتعرَّفُ الصورَ التآصليَّةَ للكربونِ واختلافَ تراكيبِها البنائيَّةِ.
- يفسِّرُ تأثيرَ اختلافِ التراكيبِ البنائيَّةِ للصورِ التآصليَّةِ للكربونِ على خصائصِها.

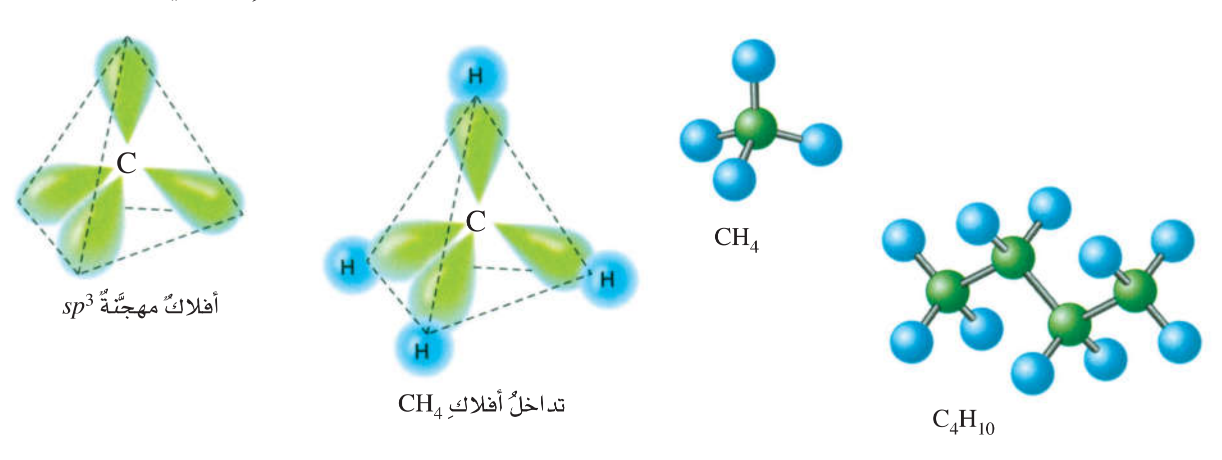
يتواجدُ الكربونُ في الطبيعةِ إما كعنصرٍ منفردٍ، أو متَّحدًا في مركَّباتٍ. وعلى الرغمِ من أن الكربونَ يُصنَّفُ العنصرَ 17 من حيثُ ترتيبُ العناصرِ بحسبِ كتلتِها في القشرةِ الأرضيَّةِ، فإنَّه متوافرٌ بكميّاتٍ ضخمةٍ أيضًا لوجودِهِ في جميعِ الكائناتِ الحيَّةِ. فهو موجودٌ في أنسجةِ الجسمِ، وفي الغذاءِ الذي نتناولُه، وفي الوقودِ الشائعِ الاستعمالِ كالفحمِ والبترولِ والغازِ الطبيعيِّ والخشبِ.

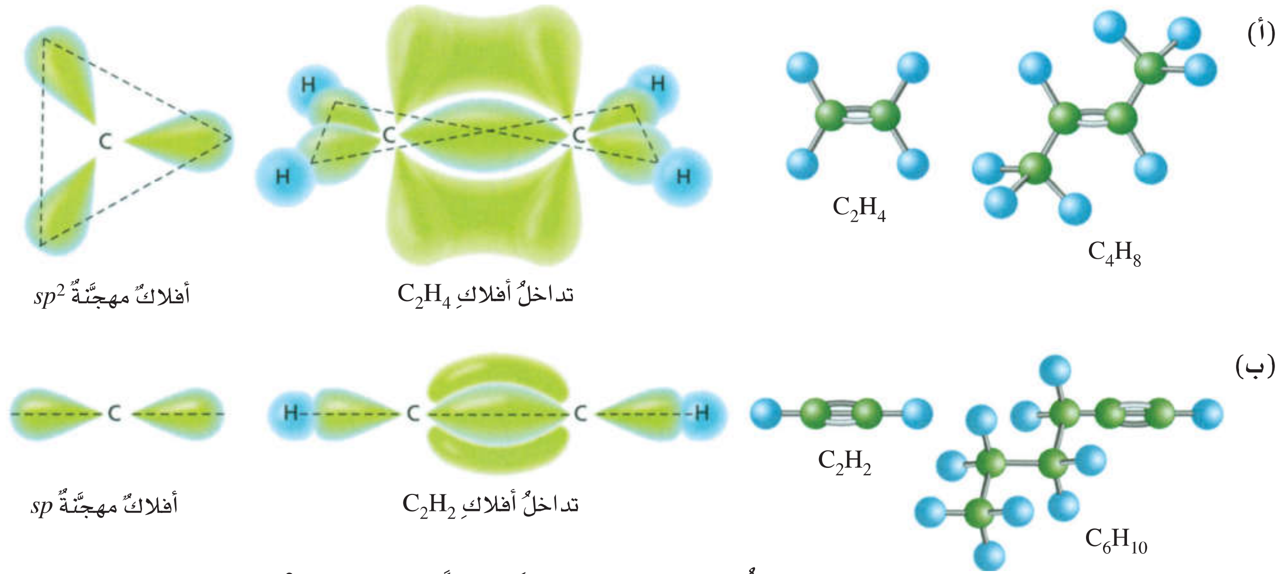
التركيبُ البنائيُّ للكربونِ وروابطُه

للكربونِ العنصرِ الأوَّلِ في المجموعةِ 14 خصائصُ لافلزّيَّةٌ. ولذرَّتِهِ في حالتِها العاديَّةِ (الأرضيَّةِ) الترتيبُ الإلكترونيُّ $1s^2 2s^2 2p^2$. يرتبطُ الإلكترونانِ في $1s$ بقوَّةٍ إلى النواةِ، ويكونُ الإلكترونانِ في $2s$ والإلكترونانِ في $2p$ إلكتروناتٍ تكافؤٍ. لذرّاتِ الكربونِ ميلٌ قويٌّ إلى المشاركةِ في الإلكتروناتِ وتكوينِ روابطَ تساهميَّةٍ.

وكما تعلَّمتَ سابقًا، فإنَ بالإمكانِ استخدامَ التهجينِ لتوضيحِ الطريقةِ التي تترابطُ فيها معظمُ المركَّباتِ الكربونيَّةِ والوصولِ إلى شكلِها الهندسيِّ. فذرّاتُ الكربونِ التي تكوِّنُ أربعةَ روابطَ أحاديَّةٍ لها أربعةُ أفلاكِ sp^3. تتَّجهُ هذه الأفلاكُ نحوَ الزوايا الأربعِ في رباعيِّ الأوجهِ المنتظمِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 1-10. ينتجُ عن ذلك الشكلُ رباعيُّ الأوجهِ للميثانِ، CH_4، والنمطِ المتعرِّجِ (⋀⋀) في الجزيئاتِ المكوَّنةِ من ذرّاتِ كربونٍ متعدِّدةِ الروابطِ الأحاديَّةِ مثل، C_4H_{10}.

الشكل 1-10 تُظهرُ نماذجُ الأفلاكِ العلاقةَ بينَ اتِّجاهِ أفلاكِ sp^3 المهجَّنةِ والشكلِ الهندسيِّ لـ CH_4، و C_4H_{10}.





الشكل 2-10 (أ) ثلاثةُ أفلاكٍ sp^2 مهجَّنةٍ تقعُ في المستوى نفسِه. يُظهرُ نموذجُ تداخلِ أفلاكِ C_2H_4 اتجاهَ أفلاكِ sp^2 المهجَّنةِ في الجزيئاتِ المحتويةِ على رابطةٍ ثنائيَّةٍ مثل C_2H_4، و C_4H_8. (ب) يُظهرُ تداخلُ أفلاكِ C_2H_2 اتجاهَ أفلاكِ sp المهجَّنةِ في الجزيئاتِ المحتويةِ على رابطةٍ ثلاثيَّةٍ، مثل C_2H_2، و C_6H_{10}.

تكوِّنُ ذرّاتُ الكربونِ روابطَ ثنائيَّةً خلالَ تهجينِ sp^2، كما هو مبيَّنٌ في الشكل 10-2(أ). وعندما تكوِّنُ ذرّاتُ الكربونِ روابطَ ثنائيَّةً تقعُ أفلاكُ sp^2 المهجَّنةُ لذرّتَي الكربونِ في المستوى نفسِه، كما هو مبيَّنٌ في نموذجِ تداخلِ أفلاكِ الإيثين، C_2H_4. ولما كانتْ ذرّاتُ الهيدروجينِ لـ C_2H_4 مرتبطةً هي الأخرى مع أفلاكِ الكربونِ sp^2 فإن الذرّاتِ الستَّ تقعُ في المستوى نفسِه. تبيِّنُ النماذجُ ثلاثيَّةُ الأبعادِ لـ C_2H_4 و C_4H_8 ترتيبَ الجزيئاتِ المحتويةِ على روابطِ الكربونِ–الكربونِ الثنائيَّةِ.

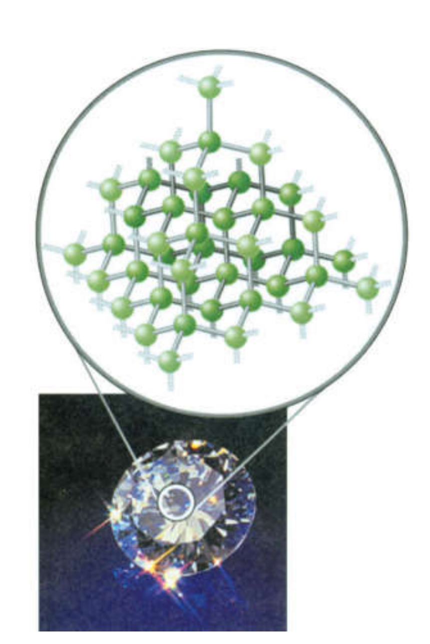
تكونُ روابطُ الكربونِ الثلاثيَّةُ خطِّيَّةً، بسببِ الترتيبِ الخطِّيِّ لأفلاكِ sp المهجَّنةِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكل 10-2(ب). يمكنُ ملاحظةُ ذلك في نموذجِ تداخلِ أفلاكِ الإيثاين، C_2H_2. يُظهرُ نموذجا C_2H_2 و C_6H_{10} الثلاثيّا الأبعادِ ترتيبَ الجزيئاتِ المحتويةِ على روابطِ الكربونِ–الكربونِ الثلاثيَّةِ.

الصورُ التآصليَّةُ للكربونِ

تتواجدُ بعضُ العناصرِ على عدَّةِ صورٍ في الطبيعةِ، تتشابهُ في خصائصِها الكيميائيَّةِ وتختلفُ في خصائصِها الفيزيائيَّةِ، وتُعرفُ هذه الظاهرةُ بالتآصلِ. ويظهرُ الكربونُ بصورٍ صلبةٍ تآصليَّةٍ متعدِّدةٍ تتميَّزُ بخصائصَ مختلفةٍ. **فالماسُ diamond *صورةٌ صلبةٌ بلَّوريَّةٌ عديمةُ اللونِ من صورِ الكربونِ.* والجرافيتُ graphite *مادَّةٌ بلَّوريَّةٌ سوداءُ هشَّةٌ ناعمةُ الملمسِ موصِّلةٌ للكهرباءِ.* والفوليرينُ fullerene *مادَّةٌ صلبةٌ ذاتُ لونٍ داكنٍ مكوَّنةٌ من ذرّاتِ كربونٍ مرتَّبةٍ بشكلِ أقفاصٍ كرويَّةٍ.***

الماس

الماسُ أصلبُ مادَّةٍ معروفةٍ، وأكثرُ أشكالِ الكربونِ كثافةً. تفوقُ كثافةُ الماسِ كثافةَ الماءِ بثلاثِ مرّاتٍ ونصفٍ. وللماسِ أيضًا درجةُ انصهارٍ مرتفعةٌ جدًّا (أكثرَ من 3500°C). يمكنُ تفسيرُ خصائصِ الماسِ هذه من خلالِ تركيبِه البنائيِّ. يبيِّنُ النموذجُ في الشكل 10-3 ذرّاتِ كربونٍ في الماسِ مرتبطةً تساهميًّا بشكلِ شبكةٍ. ترتبطُ كلُّ ذرّةِ كربونٍ بأربعِ ذرّاتِ كربونٍ في شكلٍ رباعيِّ الأوجهِ. وقد قيسَتِ المسافةُ بين أنويةِ ذرّاتِ الكربونِ في هذا



الشكل 3-10 تتكدَّسُ ذرّاتُ الكربونِ في الماسِ بشدَّةٍ بعضُها فوقَ بعضٍ، لأنَّ كلَّ ذرَّةِ كربونٍ مرتبطةٌ بأربعِ ذرّاتِ كربونٍ ذاتِ شكلٍ رباعيِّ الأوجهِ.

الشكلِ فكانَتْ 154 pm. وبسببِ صلابةِ الماسِ الخارقةِ ودرجةِ انصهارِه المرتفعةِ، انحصرَتِ الاستخداماتُ الصناعيَّةُ للماسِ في مجالاتِ قطعِ المعادنِ والموادِّ الصلبةِ الأخرى، وحفرِها وتنعيمِها.

ومن الخصائصِ المهمَّةِ الأخرى للماسِ قدرتُه على توصيلِ الحرارةِ. فبلَّورةُ الماسِ توصِّلُ الحرارةَ بسرعةٍ تفوقُ بخمسةِ أمثالٍ سرعةَ انتقالِ الحرارةِ في الفضَّةِ أو النحاسِ اللذَيْن يُعدّان من أفضلِ الموصِّلاتِ الفلزّيَّةِ. يتمُّ التوصيلُ الحراريُّ في الماسِ عن طريقِ انتقالِ طاقةِ الاهتزازِ من ذرّةِ كربونٍ إلى أخرى. وتتمُّ هذه العمليَّةُ في بلَّورةِ الماسِ بكفاءةٍ عاليةٍ جدًّا لصغرِ كتلةِ ذرّاتِ الكربونِ، ولأن القوى التي تربطُ بينَ الذرّاتِ شديدةٌ وتتمكَّنُ بسهولةٍ من نقلِ الحركةِ الاهتزازيَّةِ خلالَ الذرّاتِ. من ناحيةٍ أخرى فإن الماسَ لا يوصِّلُ الكهرباءَ، على عكسِ بقيَّةِ الفلزّاتِ، ويُعزى ذلك إلى انشغالِ إلكتروناتِ التكافؤ كافَّةً في تكوينِ روابطَ تساهميَّةٍ متموضعةٍ. وبذلك لا يتمكَّنُ أيٌّ من الإلكتروناتِ من الابتعادِ.

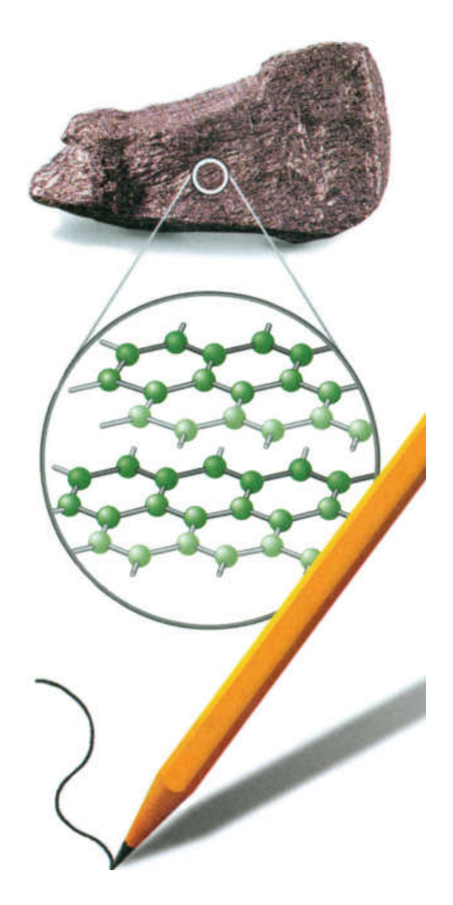
الجرافيت

يمتازُ الجرافيتُ بنعومتِه وهشاشتِه، مثلما يمتازُ الماسُ بصلابتِه وقوَّتِه. ولشدَّةِ نعومةِ الجرافيتِ يكونُ انزلاقيًّا ويتفتَّتُ بسهولةٍ. وتُفسَّرُ هاتان الخاصَّتانِ من خلالِ التركيبِ البنائيِّ للجرافيتِ. تترتَّبُ ذرّاتُ الكربونِ في الجرافيتِ بشكلِ طبقاتٍ تكوِّنُ صفائحَ رقيقةً سداسيَّةً. لاحظِ النموذجَ في الشكلِ 10-4.

وتبلغُ المسافةُ بين أنويةِ ذرّاتِ الكربونِ المتجاورةِ في الطبقةِ 142 pm. هذه المسافةُ تقلُّ عن المسافةِ الموجودةِ بين أنويةِ ذرّاتِ الكربونِ المتجاورةِ في الماسِ. من ناحيةٍ أخرى تبلغُ المسافةُ بين ذرّاتِ الطبقاتِ المتجاورةِ 335 pm. وبالنظرِ إلى ارتفاعِ متوسِّطِ المسافةِ بين ذرّاتِ الكربونِ في الجرافيتِ عما هي عليه في الماسِ، يتَّصفُ الجرافيتُ بكثافةٍ أقلَّ.

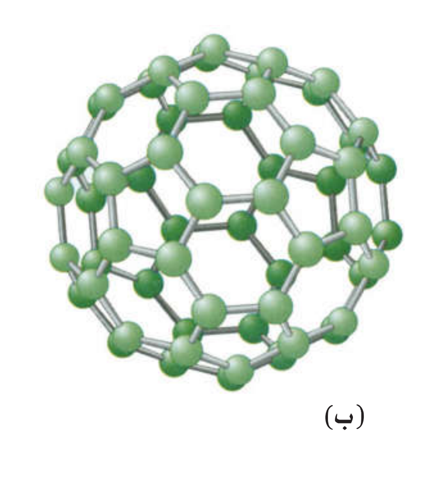
كذلك، تتباعدُ طبقاتُ ذرّاتِ الكربونِ في الجرافيتِ كثيرًا مما يجعلُ ترابطَها بروابطَ تساهميَّةٍ أمرًا صعبًا، وترتبطُ بين الطبقاتِ عادةً قوى تشتُّتٍ لندنَ الضعيفةُ فقط. وبذلك تصبحُ الطبقاتُ عُرضةً للانزلاقِ بعضُها فوقَ بعضٍ. وبسببِ خاصّةِ الانزلاقِ هذه، يُستخدمُ الجرافيتُ للتشحيمِ، وفي صناعةِ أقلامِ الرصاصِ.

ترتبطُ كلُّ ذرّةِ كربونٍ داخلَ كلِّ طبقةٍ بثلاثِ ذرّاتِ كربونٍ فقطْ مما يؤدّي إلى وجودِ إلكتروناتٍ غيرِ متموضعةٍ فيكونُ الجرافيتُ موصِّلاً جيِّدًا للكهرباءِ لأن الإلكتروناتِ غيرَ المتموضعةِ فيه تتحرَّكُ بحرّيَّةٍ خلالَ كلِّ طبقةٍ من طبقاتِه. ويشبهُ الجرافيتُ الماسَ من ناحيةِ درجةِ انصهارِه المرتفعةِ التي تبلغُ 3652°C. يُعزى ذلك إلى التركيبِ البنائيِّ الناتجِ عن الإلكتروناتِ غيرِ المتموضعةِ والذي يُشكِّلُ شبكةً قويَّةً من الروابطِ التساهميَّةِ. ومن الاستخداماتِ الأخرى للجرافيتِ تصنيعُ أليافِ الجرافيتِ التي تكونُ أقوى وأصلبَ من الفولاذِ ولكن أقلَّ كثافةً. أدَّتْ قوَّةُ أليافِ الجرافيتِ وخفَّةُ وزنِها إلى استخدامِها في إنتاجِ الأدواتِ الرياضيَّةِ، وفي صناعةِ هياكلِ الطائراتِ.



الشكل 10-4 لاحظِ المسافاتِ بين صفائحِ مادَّةِ الجرافيتِ في نموذجِ الكراتِ والعيدانِ. يتركُ قلمُ الرصاصِ أثرًا في الورقِ، لأن الطبقاتِ المتجاورةَ يمكنُ أن ينزلقَ بعضُها فوقَ بعضٍ.

(أ)



(ب)

(ج)

الشكل 10-5 (أ) بكمنستر فوليرين اسمٌ يعودُ إلى بكمنستر فولر، الرجل الذي صمَّمَ قبَّةَ الجيوديسك التي تظهرُ هنا في الصورةِ. (ب) يشبهُ التركيبُ البنائيُّ لبكمنستر فوليرين الشكلَ النمطيَّ لكرةِ القدمِ (ج).

الفوليرينات

في منتصفِ الثمانينيّاتِ من القرنِ الماضي، اكتُشِفَ نوعٌ جديدٌ من الصورِ التآصليَّةِ للكربونِ. ومُنِحَتْ عامَ 1996 جائزةُ نوبل لكلٍّ من ريتشارد سمولي وروبرت كيرل، وهوارد كاروتو، وهمْ قادةُ الفِرَقِ التي اكتشفَتْ هذا المركَّبَ.

والفوليرينُ fullerene جزءٌ من «السناجِ» الذي يتكوَّنُ لدى احتراقِ الموادِّ المحتويةِ على الكربونِ مع كمّيَّةٍ محدَّدةٍ من الأكسجينِ. والتركيبُ البنائيُّ للفوليرينِ يتألَّفُ من ذرّاتِ كربونٍ تشكِّلُ أقفاصًا شبهَ كرويَّةٍ. وأكثرُ الأشكالِ استقرارًا هو C_{60} الذي تشاهدُه في الشكلِ 10-5. يتكوَّنُ C_{60} من 60 ذرّةَ كربونٍ مرتَّبةً بشكلِ حلقاتٍ مترابطةٍ من خمسِ أو ستِّ ذرّاتٍ.

وبسببِ تشابهِ الفوليرينِ مع قبَّةِ الجيوديسكِ، أطلقَ ريتشارد سمولي وجماعتُه اسمَ «بكمنستر فوليرين» على C_{60} نسبةً إلى المهندسِ المعماريِّ الذي صمَّمَ هذه القبَّةَ. وتسمّى عمومًا بقيَّةُ عائلةِ أقفاصِ ذرّاتِ الكربونِ، التي تشتملُ على مدى واسعٍ من عددِ الذرّاتِ، بالفوليريناتِ. ولتشابهِ C_{60} مع تصميمِ كرةِ القدمِ، عُرِفَ C_{60} أيضًا باسمِ «كرة باكي» Bucky ball. ويحاولُ العلماءُ اليومَ إيجادَ استخداماتٍ عمليَّةٍ لهذه المركَّباتِ.

مراجعةُ القسم 1-10

1. ما الذي يجعلُ الكربونَ من العناصرِ المهمَّةِ في دراسةِ الكيمياءِ؟

2. ما نوعُ الفلكِ المهجَّنِ الموجودِ في الرابطةِ الثنائيَّةِ للكربونِ؟ وفي الرابطةِ الثلاثيَّةِ للكربونِ؟

3. ما العلاقةُ بينَ التركيبِ البنائيِّ للجرافيتِ وبين خصائصِه واستخداماتِه؟

4. ما أوجهُ الشبهِ والاختلافِ بينَ التراكيبِ البنائيَّةِ المختلفةِ للفوليريناتِ؟

القسم 2-10

المركَّباتُ العضويَّةُ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يفسِّرُ كيف تؤدّي بنيةُ الكربونِ وترابطُه إلى تنوُّعِ المركَّباتِ العضويَّةِ وعددِها الهائلِ.
- يفسِّرُ أهميَّةَ الصيغِ البنائيَّةِ والجزيئيَّةِ.
- يقارنُ بين الأيزومراتِ الهندسيَّةِ والأيزومراتِ البنائيَّةِ.

تحتوي جميعُ المركَّباتِ العضويَّةِ على ذرّاتِ كربونٍ، علمًا أن المركَّباتِ المحتويةَ على كربونٍ ليستْ كلُّها مركّباتٍ عضويَّةً، فهنالك استثناءاتٌ، مثلُ Na_2CO_3، CO، CO_2 التي تُعدُّ مركَّباتٍ غيرَ عضويَّةٍ. **المركَّباتُ العضويَّةُ organic compounds** تُعرَّفُ على ***أنها مركَّباتٌ تحتوي على الكربونِ ومرتبطةٌ تساهميًا، ما عدا الكربوناتِ وأكاسيدَ الكربونِ.*** يُظهرُ الشكلُ 10-6 موادَّ شائعةً تحتوي على مركَّباتٍ عضويَّةٍ.

ترابطُ الكربونِ وتنوُّعُ المركَّباتِ العضويَّةِ

إن سببَ تنوُّعِ المركَّباتِ العضويَّةِ ناتجٌ عن تفرُّدِ بنيةِ ذرَّةِ الكربونِ وترابطِها. إذ يسمحُ التركيبُ الإلكترونيُّ لذرَّةِ الكربونِ بأن ترتبطَ بمثيلاتِها من الذرّاتِ، مكوِّنةً سلاسلَ أو حلقاتٍ، وأن ترتبطَ تساهميًّا بذرّاتِ عناصرَ أخرى، كما تسمحُ لها بأن ترتبطَ بمثيلاتِها، وبذرّاتِ عناصرَ أخرى، في ترتيباتٍ مختلفةٍ.

الشكل 10-6 الأسبرينُ، والبولي إيثيلين في الأكياسِ البلاستيكيَّةِ، وحمضُ السيتريكِ في الفواكهِ، والأحماضُ الأمينيَّةُ في الحيواناتِ، هي جميعًا أمثلةٌ لمركَّباتٍ عضويَّةٍ.

رابطةُ الكربونِ-الكربونِ

لذرّاتِ الكربونِ قدرةٌ خاصَّةٌ على تكوينِ سلاسلَ طويلةٍ وحلقاتٍ من الذرّاتِ المترابطةِ بروابطَ تساهميَّةٍ. يسمّى هذا النوعُ من **الترابطِ بالتسلسليِّ catenation**، ***ويعني الترابطَ التساهميَّ لذرّاتِ العنصرِ نفسِه لتكوينِ سلاسلَ أو حلقاتٍ.*** وينتجُ عن ذلك تراكيبُ بنائيَّةٌ متعدِّدةٌ من سلاسلَ، وسلاسلَ متفرِّعةٍ، وحلقاتٍ. إضافةً إلى ذلك، تستطيعُ ذرّاتُ الكربونِ في هذه التراكيبِ أن ترتبطَ بواسطةِ رابطةٍ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ، أو ثنائيَّةٍ، أو ثلاثيَّةٍ. في الشكلِ 10-7، أمثلةٌ على الجزيئاتِ التي تحتوي على حلقاتٍ وسلاسلَ من ذرّاتِ الكربونِ.

ارتباطُ الكربونِ بالعناصرِ الأخرى

فضلاً عن الارتباطِ بذرّاتِ كربونٍ أخرى، ترتبطُ ذرّاتُ الكربونِ بسهولةٍ مع ذرّاتِ عناصرَ ذاتِ سالبيَّةٍ كهربائيَّةٍ مشابهةٍ لها، هذه العناصرُ والكربونُ يكوِّنانِ المركَّباتِ العضويَّةَ. **الهيدروكربونات hydrocarbons**، ***تتكوَّنُ من الكربونِ والهيدروجينِ فقط، وهي تمثِّلُ أبسطَ المركَّباتِ العضويَّةِ.*** تحتوي المركَّباتُ العضويَّةُ الأخرى على الهيدروكربوناتِ التي تكوِّنُ العمودَ الفقريَّ للمركَّبِ والذي ترتبطُ فيه بقيَّةُ العناصرِ، ولاسيما O، N، S، والهالوجيناتِ. يُبيِّنُ الشكلُ 10-8 جزيئًا ترتبطُ فيه ذرَّةُ الكربونِ بذرّاتِ عناصرَ أخرى.

ترتيبُ الذرّاتِ

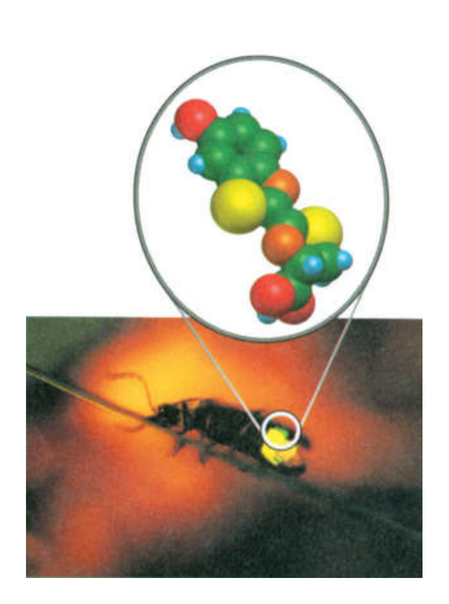
تسمحُ قدرةُ الكربونِ على الارتباطِ أيضًا بترتيباتٍ مختلفةٍ للذرّاتِ. هذا يعني أن بعضَ المركَّباتِ قد تحتوي على الذرّاتِ نفسِها، لكن بخصائصَ مختلفةٍ، لأن الذرّاتِ تترتَّبُ بشكلٍ مختلفٍ. فعلى سبيلِ المثالِ، تمثِّلُ الصيغةُ الجزيئيَّةُ C_2H_6O كلاًّ من الإيثانولِ وثنائيِّ ميثيل إيثر، بينما يختلفُ المركَّبانِ في تركيبِهما البنائيِّ. ***تُسمّى المركَّباتُ المتشابهةُ في صيغتِها الجزيئيَّةِ والمختلفةُ في تركيباتِها البنائيَّةِ بالأيزومرات isomers.*** كلّما ازدادَ عددُ ذرّاتِ الكربونِ في الصيغةِ الجزيئيَّةِ يزدادُ عددُ الأيزومراتِ المحتملةِ. هناك مثلاً، 18 أيزومرًا للصيغةِ الجزيئيَّةِ C_8H_{18}، و 35 أيزومرًا للصيغةِ الجزيئيَّةِ C_9H_{20}، و 75 أيزومرًا للصيغةِ الجزيئيَّةِ $C_{10}H_{22}$. أما الصيغةُ الجزيئيَّةُ ذاتُ 40 ذرَّةَ كربونٍ و 82 ذرَّةَ هيدروجينٍ، أي $C_{40}H_{82}$، فلها، من الناحيةِ النظريَّةِ، 831 805 178 491 69 أيزومرًا. ولكي نميِّزَ بين هذه الأيزومراتِ نحتاجُ إلى مزيدٍ من المعلوماتِ، وليس إلى الصيغةِ الجزيئيَّةِ فقط.

الصيغُ البنائيَّةُ

يستخدمُ المختصّونَ بالكيمياءِ العضويَّةِ الصيغَ البنائيَّةَ لتمثيلِ المركَّباتِ العضويَّةِ. **الصيغةُ البنائيَّةُ structural formula** ***هي الصيغةُ التي تحدِّدُ عددَ الذرّاتِ الموجودةِ في الجزيءِ ونوعَها، وترتيبَ الذرّاتِ المترابطةِ فيه.*** وكمثالٍ على إحدى الصيغِ البنائيَّةِ لأيزومرٍ لـ C_4H_{10}، نوردُ التالي:

```
    H      H      H
    |      |      |
H — C ———— C ———— C — H
    |      |      |
    H  H — C — H  H
           |
           H
```

الشكل 10-7 قارنْ بينَ شكلِ الحمضِ الدهنيِّ الموجودِ في الكريما وبينَ شكلِ الفركتوزِ الموجودِ في الفواكهِ. تكونُ ذرّاتُ الكربونِ في الحمضِ الدهنيِّ في سلاسلَ، بينما تكوِّنُ ذرّاتُ الكربونِ في الفركتوزِ حلقةً.



الشكل 10-8 ذرّاتُ الكربونِ في مادَّةِ اللوسيفرينِ في حشرةِ ذبابةِ النارِ، ترتبطُ بالهيدروجينِ والأكسجينِ والنيتروجينِ والكبريتِ. مادَّةُ اللوسيفرينِ هي المسؤولةُ عن الضوءِ الذي ينبعثُ من ذيلِ هذه الحشرةِ.

الشكل 9-10 يمكنُ تمثيلُ التركيبِ البنائيِّ للإيثانولِ بطرقٍ مختلفةٍ ويُمثِّلُ كلٌّ من نموذجِ الكراتِ والعيدانِ ونموذجِ الجزيءِ في الفراغِ الشكلَ الثلاثيَّ الأبعادَ للجزيءِ.

نموذجُ الجزيءِ في الفراغِ

نموذجُ الكراتِ والعيدانِ

```
 H   OH
 |   |
H–C—C–H
 |   |
 H   H
```

تُختصرُ الصيغُ البنائيَّةُ أحيانًا لتسهيلِ قراءتِها. وفي أحدِ أنواعِ نماذجِ التراكيبِ المختصرةِ لا تظهرُ رابطةُ الهيدروجينِ التساهميَّةُ الأحاديَّةُ. فمن المعروفِ أن ذرّاتِ الهيدروجينِ ترتبطُ بذرَّةِ الكربونِ المجاورةِ لها في الصيغةِ. تمثِّلُ الصيغةُ البنائيَّةُ والصيغةُ المختصرةُ التاليتان الجزيءَ نفسَهُ.

```
 H     H     H
 |     |     |
H–C————C————C–H        هي نفسُها        CH3–CH–CH3
 |     |     |                               |
 H   H–C–H   H                              CH3
       |
       H
```

تذكَّرْ أن الصيغةَ البنائيَّةَ لا تُظهرُ بدقَّةٍ الشكلَ الثلاثيَّ الأبعادَ للجزيءِ. ويمكنُ إظهارُ الشكلِ الثلاثيِّ الأبعادِ للجزيءِ، بالرسمِ أو بالنموذجَيْن المبيَّنَيْن في الشكل 9-10.

ستجدُ لاحقًا أن بالإمكانِ الاستغناءَ عن استخدامِ الشرطاتِ، بكتابةِ الرموزِ والأرقامِ السفليَّةِ لمجموعاتِ ذرّاتِ الكربونِ والهيدروجينِ التي تظهرُ في الجزيءِ، بشكلِ صفٍّ أفقيٍّ. مثلاً، يُكتبُ الإيثانُ CH_3CH_3 والبروبانُ $CH_3CH_2CH_3$ ... وهكذا.

الأيزومرات

تعلَّمْت أن الأيزومراتِ مركَّباتٌ لها الصيغةُ الجزيئيَّةُ نفسُها، لكنها تختلفُ في صيغتِها البنائيَّةِ. ويمكنُ تصنيفُ الأيزومراتِ أيضًا من خلالِ التركيبِ البنائيِّ والهندسيِّ.

الأيزومراتُ البنائيَّةُ

تُسمّى الأيزومراتُ البنائيَّةُ structural isomers ***أيضا بالأيزومراتِ التركيبيَّةِ constitutional isomers وهي أيزومراتٌ تترابطُ الذرّاتُ فيها بترتيبٍ مختلفٍ.*** فذرّاتُ الصيغةِ الجزيئيَّةِ C_4H_{10}، مثلاً، يمكنُ ترتيبُها بطريقتَيْن مختلفتَيْن.

```
 H  H  H  H              H     H     H
 |  |  |  |              |     |     |
H–C–C–C–C–H            H–C————C————C–H
 |  |  |  |              |     |     |
 H  H  H  H              H   H–C–H   H
                               |
                               H
   بيوتان                  2–ميثيل بروبان
```

لاحظْ أن صيغةَ البيوتانِ تتمثَّلُ بسلسلةٍ خطِّيَّةٍ من أربعِ ذرّاتِ كربونٍ، وأن هذه السلسلةَ قد تكونُ منحنيةً، لكنها مستمرَّةٌ. وتتمثَّلُ صيغةُ 2–ميثيل بروبان بسلسلةٍ مستمرَّةٍ من ثلاثِ ذرّاتِ كربونٍ وترتبطُ ذرّةُ الكربونِ الرابعةُ بذرَّةِ الكربونِ الثانيةِ في السلسلةِ.

الجدول 10-1 الخصائصُ الفيزيائيَّةُ للأيزومراتِ البنائيَّةِ بيوتان و 2-ميثيل بروبان

	درجةُ الانصهارِ (°C)	درجةُ الغليانِ (°C)	الكثافةُ عندَ 20°C (g/mL)
بيوتان	−138.4	−0.5	0.5788
2-ميثيل بروبان	−159.4	−11.633	0.549

وللأيزومراتِ البنائيَّةِ خصائصُ فيزيائيَّةٌ وكيميائيَّةٌ مختلفةٌ. فمثلاً البيوتان، و 2-ميثيل بروبان، مختلفانِ في درجةِ الغليانِ والانصهارِ والكثافة، كما هو مبيَّنٌ في الجدول 10-1.

الأيزومراتُ الهندسيَّةُ

الأيزومراتُ الهندسيَّةُ geometric isomers ***أيزومراتٌ يتشابهُ فيها ترتيبُ الروابطِ بينَ الذرّاتِ ويختلفُ فيها ترتيبُ الذرّاتِ في الفضاءِ.*** تأمَّل الجزيءَ 1،2-ثنائي كلورو إيثين الذي يحتوي على رابطةٍ ثنائيَّةٍ تمنعُ حركةَ الدورانِ الحرِّ، مما يثبِّتُ المجموعاتِ على جانبَي الجزيءِ. وهذا يعني أن هنالك نوعَين من الأيزومراتِ الهندسيَّةِ لـ 1،2-ثنائي كلورو إيثين، كما يلي:

```
Cl      Cl          H       Cl
  \    /              \    /
   C=C                 C=C
  /    \              /    \
H       H           Cl      H

  مع (م) cis          ضد (ض) trans
```

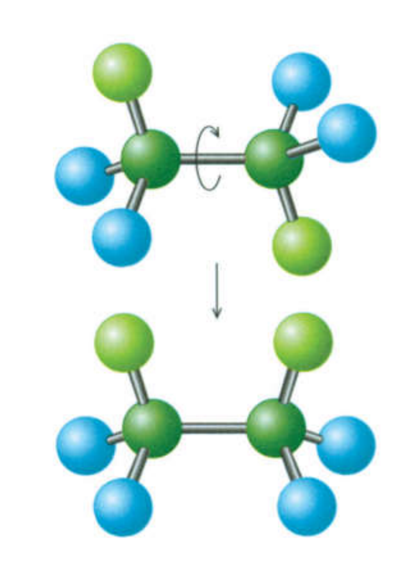
وبما أن ذرّتَي الكلورِ تقعان على جانبٍ واحدٍ من الرابطةِ الثنائيَّةِ في التركيبِ الأوّلِ فإن التركيبَ يُسمّى مع (م) cis. وفي الجزيءِ الثاني تقعُ ذرّتا الكلورِ على جانبَين متقابلَين من الرابطةِ، ويُسمّى الجزيءُ عندئذٍ ضد (ض) trans. لاحظْ أن ترتيبَ الترابطِ في جميعِ الذرّاتِ هو نفسُهُ لا يتغيَّرُ. فكلُّ ذرَّةِ كربونٍ في الرابطةِ الثنائيَّةِ مرتبطةٌ أيضًا بذرَّةِ كلورٍ وذرَّةِ هيدروجينٍ.

لنعتبرِ الآنَ الجزيءَ 1،2-ثنائي كلورو إيثان، حيثُ تتَّصلُ الذرّاتُ بذرّاتِ الكربونِ بطريقةٍ تسمحُ لها بالدورانِ بحرّيَّةٍ حولَ رابطةِ كربونٍ-كربونٍ الأحاديَّةِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 10-10. من المعروفِ أنه لا يوجدُ أيزومرٌ هندسيٌّ للمركَّبِ 1،2-ثنائي كلورو إيثان. ***فوجودُ الأيزومرِ الهندسيِّ، يتطلَّبُ وجودَ تركيبٍ ثابتٍ في الجزيءِ يمنعُ حركةَ الدورانِ الحرَّةِ حولَ الرابطةِ.***

الآن، اعتبرِ التركيبَيْنِ لجزيءٍ آخرَ يحتوي على رابطةٍ ثنائيَّةٍ، هو كلورو إيثين.

```
H       H           H       Cl
  \    /              \    /
   C=C                 C=C
  /    \              /    \
H       Cl          H       H
```

فمع أن هذَيْن التركيبَيْن يَظهران مختلفين للوهلةِ الأولى فإنهما في الحقيقةِ تركيبٌ واحدٌ. ففي كلا التركيبَينِ ذرّتا هيدروجينٍ على جانبٍ واحدٍ من الرابطةِ وذرَّةُ كلورٍ مع



الشكل 10-10 على عكسِ الرابطةِ الثنائيَّةِ، تسمحُ الرابطةُ الأحاديَّةُ بالحركةِ الدورانيَّةِ ضمنَ الجزيءِ. المجموعاتُ المتَّصلةُ بذرّاتِ الكربونِ ليست متموضعةً على جانبٍ واحدٍ من الجزيءِ، وبذلك لا يوجدُ أيزومرٌ هندسيٌّ.

الشكل 10-11 يستجيبُ نوعٌ من ذكورِ ثاقبِ الذرةِ (حشرةٌ تثقبُ الأجزاءَ الخشبيَّةَ من النباتِ) استجابةً قويَّةً لخليطٍ من فرموناتِ الجذبِ لدى الأنثى، والتي تحتوي على الأيزومرِ (م) بنسبةِ 96%. وهناكَ أنواعٌ أخرى من الذكورِ تستجيبُ بشكلٍ قويٍّ لخليطٍ يحتوي على الأيزومرِ (ض) بنسبةِ 97%.

$$\begin{array}{ccc} CH_3CH_2 & & (CH_2)_9CH_2O\overset{O}{\overset{\|}{C}}CH_3 \\ & C{=}C & \\ H & & H \end{array}$$

م-11-رباعي ديكينيل أسيتات

$$\begin{array}{ccc} H & & (CH_2)_9CH_2O\overset{O}{\overset{\|}{C}}CH_3 \\ & C{=}C & \\ CH_3CH_2 & & H \end{array}$$

ض-11-رباعي ديكينيل أسيتات

ذرّةِ هيدروجينٍ على الجانبِ الآخرِ. ***يمكنُ أن يكونَ للجزيءِ أيزومرٌ هندسيٌّ عندما يحتوي على ذرّتَيْ كربونٍ في تركيبٍ ثابتٍ وترتبطُ كلٌّ منهما بمجموعتين مختلفتين.***

ويشيرُ الشكلُ 10-11، إلى مثالٍ من الطبيعةِ للأيزومراتِ الهندسيَّةِ.

مراجعةُ القسم 10-2

1. ما الخصائصُ الثلاثُ للكربونِ التي تساهمُ في تنوُّعِ المركَّباتِ العضويَّةِ؟

2. عرِّفِ «الأيزومرَ» وميِّزْ بينَ الأيزومراتِ البنائيَّةِ والأيزومراتِ الهندسيَّةِ.

3. أيُّ الأنواعِ التاليةِ من التمثيلِ الجزيئيِّ يمكنُ استخدامُهُ لإبرازِ الاختلافِ بينَ الأيزومراتِ؟ علِّلْ إجابتَكَ.

أ. صيغةٌ جزيئيَّةٌ

ب. صيغةٌ بنائيَّةٌ

ج. شكلٌ أو نموذجٌ ثلاثيُّ الأبعادِ

4. أيُّ مما يلي يمثِّلُ الجزيءَ نفسَهُ؟

أ.
$$\begin{array}{ccccccccccc} & & H & & H & & H & & H & & H \\ & & | & & | & & | & & | & & | \\ H & - & C & - & C & - & C & - & C & - & C & - & H \\ & & | & & | & & | & & | & & | \\ & & H & & H & & H & & H & & H \end{array}$$

ب. $CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$

ج.
$$\begin{array}{l} CH_3{-}CH_2{-}CH_2 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\; CH_2 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\; CH_3 \end{array}$$

د. C_5H_{12}

تفكيرٌ ناقدٌ

5. **تفسيرُ مفاهيم:** علِّلْ: يُعدُّ المركَّبانِ التاليانِ أيزومرَيْنِ بنائيَّيْنِ:

$$\begin{array}{l} CH_3{-}\underset{\underset{Cl}{|}}{CH}{-}CH_2{-}Cl \end{array} \quad \text{و} \quad \begin{array}{l} CH_3{-}CH_2{-}\underset{\underset{Cl}{|}}{CH}{-}Cl \end{array}$$

القسم 3-10

مؤشّراتُ الأداءِ

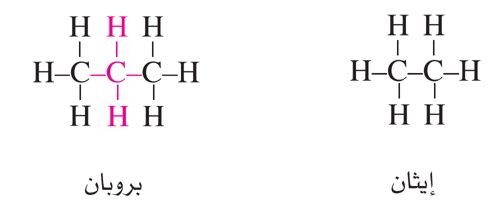
- يتعرَّفُ ميزاتِ التركيبِ البنائيِّ للهيدروكربوناتِ المشبعةِ، الألكاناتِ.
- يكتبُ الصيغَ البنائيَّةَ للألكاناتِ ويسمّيها.
- يجدُ العلاقةَ بين التركيبِ البنائيِّ للألكاناتِ وخصائصِها.
- يبيّنُ أثرَ خصائصِ الألكاناتِ على استخداماتِها.

الهيدروكربوناتُ المشبعةُ

تصنَّفُ الهيدروكربوناتُ وفقًا لنوعِ الرابطةِ بين ذرّاتِ الكربونِ بشكلٍ أساسٍ. فالهيدروكربوناتُ المشبعةُ **saturated hydrocarbons** ***هي الهيدروكربوناتُ التي ترتبطُ فيها كلُّ ذرّةِ كربونٍ في الجزيءِ بأربعةِ روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ مع ذرّاتٍ أخرى.***

الألكانات

الألكاناتُ alkanes ***هي الهيدروكربوناتُ التي تحتوي على روابطَ أحاديَّةٍ فقط.*** يبيّنُ الجدولُ 10-2 الصيغَ الجزيئيَّةَ والصيغَ البنائيَّةَ ونماذجَ الجزيئاتِ في الفراغِ لألكاناتٍ مكوَّنةٍ من ذرّةِ كربونٍ إلى أربعٍ. إذا تفحَّصتَ الصيغَ الجزيئيَّةَ للألكاناتِ المتعاقبةِ في الجدولِ 10-2 سترى نمطًا واضحًا من الترتيبِ التصاعديِّ، حيثُ يختلفُ كلُّ مركَّبٍ في السلسلةِ عن سابقِهِ بذرَّةِ كربونٍ واحدةٍ وذرّتَيْ هيدروجينٍ. فالبروبانُ C_3H_8 مثلاً يختلفُ عن الإيثانِ C_2H_6، بذرَّةِ كربونٍ وذرّتَيْ هيدروجينٍ، أيْ مجموعة $-CH_2-$.



إيثان   بروبان

والمركَّباتُ التي تختلفُ على هذا النمطِ تنتمي إلى سلسلةٍ متجانسةٍ. وفي **السلسلةِ المتجانسةِ homologous series** ***تختلفُ صيغُ المركَّباتِ المتجاورةِ بوحدةٍ ثابتةٍ.*** هذا يعني أنَّ من غيرِ الضروريِّ تذكُّرَ الصيغِ الجزيئيَّةِ لجميعِ مركَّباتِ السلسلةِ المتجانسةِ، بدلاً من ذلك، يمكنُ استخدامُ صيغةٍ جزيئيَّةٍ عامَّةٍ لتحديدِ الصيغِ. فبالنظرِ إلى الصيغِ الجزيئيَّةِ للإيثانِ والبروبانِ، C_2H_6 و C_3H_8، مثلاً نجدُ أن الصيغتَينِ تحقّقان الصيغَ العامَّةَ C_nH_{2n+2}. فللإيثانِ، $n = 2$، أي يوجدُ ذرَّتا كربونٍ و 6 ذرّاتِ هيدروجينٍ، $6 = 2 + (2 \times 2)$. وللبروبانِ ثلاثُ ذرّاتِ كربونٍ، $n = 3$، وثماني ذرّاتِ هيدروجينٍ، $8 = 2 + (2 \times 3)$. لنتأمّلِ الآنَ جزيئًا لا نعرفُ صيغتَه الجزيئيَّةَ. ولنفترضْ أن مركَّبًا من هذه السلسلةِ يتكوَّنُ من 30 ذرَّةَ كربونٍ. هذا يعني أن $n = 30$، وعددَ ذرّاتِ الهيدروجينِ يساوي $62 = 2 + (2 \times 30)$. وتكونُ صيغتُه الجزيئيَّةُ إذًا $C_{30}H_{62}$.

لاحظْ أن الألكاناتِ التي تحتوي على 3 ذرّاتِ كربونٍ أو أقلَّ، ليس لها إلا صيغةٌ بنائيَّةٌ واحدةٌ. لكن في الألكاناتِ التي تحتوي على أكثرَ من ثلاثِ ذرّاتِ كربونٍ، تكونُ السلسلةُ متفرِّعةً أو مستقيمةً. لهذا يكونُ للألكاناتِ التي تحتوي على أربعِ ذرّاتِ كربونٍ أو أكثرَ أيزومراتٌ بنائيَّةٌ، فهنالك أيزومران بنائيّان محتملانِ للألكانِ المحتوي على 4 ذرّاتِ كربونٍ، هما البيوتان و 2-ميثيل بروبان.

الجدول 2-10 ألكاناتٌ مكوَّنةٌ من ذرّةِ كربونٍ واحدةٍ إلى أربعِ ذرّاتٍ

الصيغةُ الجزيئيَّةُ	الصيغةُ البنائيَّةُ	نماذجُ الجزيئاتِ في الفراغِ
CH_4	H H–C–H H ميثان	
C_2H_6	H H H–C–C–H H H إيثان	
C_3H_8	H H H H–C–C–C–H H H H بروبان	
C_4H_{10}	H H H H H–C–C–C–C–H H H H H بيوتان H H H H–C——C——C–H H H–C–H H H 2–ميثيل بروبان	

الألكاناتُ الحلقيَّةُ

الألكاناتُ الحلقيَّةُ cycloalkanes ***ألكاناتٌ تترتَّبُ فيها ذرّاتُ الكربونِ على شكلِ حلقةٍ.*** وغالبًا ما تُرسمُ الصيغُ البنائيَّةُ للألكاناتِ الحلقيَّةِ بشكلٍ مبسَّطٍ. ويفهمُ، من هذه الأشكالِ الهيكليَّةِ التاليةِ، أن هنالك ذرّةَ كربونٍ في كلِّ ركنٍ من الهيكلِ وعددًا من ذرّاتِ الهيدروجينِ ما يكفي لاكتمالِ الروابطِ الأربعةِ المتَّصلةِ بكلِّ ذرَّةِ كربونٍ.

CH_2
CH_2 CH_2
CH_2-CH_2

بنتان حلقيّ

أو

بنتان حلقيّ

ولعدم وجودِ طرفٍ حرٍّ للألكانِ الحلقيِّ ترتبطُ فيه ذرَّةُ كربونٍ بثلاثِ ذرّاتِ هيدروجينٍ، فإن عددَ ذرّاتِ الهيدروجينِ للألكانِ الحلقيِّ أقلُّ بذرَّتيْنِ من عددِ ذرّاتِ الألكانِ غيرِ الحلقيِّ.

```
 H  H          H  H  H  H
 |  |          |  |  |  |
H–C–C–H      H–C–C–C–C–H
 |  |          |  |  |  |
H–C–C–H        H  H  H  H
 |  |
 H  H
```

بيوتان حلقيّ C_4H_8 — بيوتان C_4H_{10}

تبيِّنُ الصيغةُ الجزيئيَّةُ العامَّةُ للألكاناتِ الحلقيَّةِ C_nH_{2n}، أنها تحتوي على $2 \times n$ من ذرّاتِ الهيدروجينِ، أي أقلَّ بذرّتَينِ من الألكانِ غيرِ الحلقيِّ المعروفِ بصيغتِه C_nH_{2n+2}، والذي يحتوي على $(2 \times n) + 2$ من ذرّاتِ الهيدروجينِ.

تسميةُ الألكاناتِ

معظمُ أسماءِ المركَّباتِ العضويَّةِ اشتُقَّتْ من أسماءِ المصادرِ التي وُجِدَتْ فيها. وبزيادةِ عددِ المركَّباتِ العضويَّةِ المكتشفةِ بات لزامًا إيجادُ طريقةٍ موحَّدةٍ منهجيَّةٍ لتسميتِها. والطريقةُ المعتمدةُ في هذا الكتابِ طوَّرَها الاتحادُ الدوليُّ للكيمياءِ البحتةِ والتطبيقيَّةِ، (الأيوباك) IUPAC، International Union of Pure and Applied Chemistry.

الجزءُ الأساسيُّ للاسمِ وفقًا لنظامِ الأيوباكِ لمركَّبٍ عضويٍّ هو اسمُ السلسلةِ الكربونيَّةِ الأطولِ أو اسمُ الهيدروكربونِ الأمِّ في الجزيءِ. يقدِّمُ الجدولُ 10-3 أسماءَ البادئاتِ لسلاسلِ ذرّاتِ الكربونِ، حتّى السلسلةِ المكوَّنةِ من 10 ذرّاتِ كربونٍ. ابتداءً من «بنت» pent تكونُ البادئاتُ عدديَّةً يونانيَّةً أو لاتينيَّةً.

الجدول 10-3 بادئاتُ سلسلةِ ذرّاتِ الكربونِ

عددُ ذرّاتِ الكربونِ	البادئة
1	meth- ميث-
2	eth- إيث-
3	prop- بروب-
4	but- بيوت-
5	pent- بنت-
6	hex- هكس-
7	hept- هبت-
8	oct- أوكت-
9	non- نون-
10	dec- ديك-

تسميةُ ألكاناتِ السلسلةِ غيرِ المتفرِّعةِ

لتسميةِ الألكاناتِ غيرِ المتفرِّعةِ، جِدِ البادئةَ في الجدولِ 10-3 التي تتطابقُ مع عددِ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ الهيدروكربونيَّةِ. ثم أضفِ المقطعَ -ان إلى البادئةِ. يوضحُ ذلك المثالُ التالي:

$$\overset{1}{CH_3}–\overset{2}{CH_2}–\overset{3}{CH_2}–\overset{4}{CH_2}–\overset{5}{CH_2}–\overset{6}{CH_2}–\overset{7}{CH_3}$$

هبتان

للجزيءِ سلسلةٌ من 7 ذرّاتِ كربونٍ. لذلك تضافُ البادئةُ هبت- (ومعناها سبعة) إلى المقطعِ -ان لتكوينِ هبتان.

تسميةُ ألكاناتِ السلسلةِ المتفرِّعةِ

تتَّبعُ تسميةُ ألكاناتِ السلسلةِ المتفرِّعةِ هي الأخرى طريقةً منهجيَّةً. وتُسمّى التفرُّعاتِ الهيدروكربونيَّةَ للألكاناتِ بمجموعاتِ الألكيلِ. **مجموعاتُ الألكيلِ alkyl groups** ***مجموعاتٌ من الذرّاتِ تتكوّنُ عند إزالةِ إحدى ذرّاتِ الهيدروجينِ من جزيءِ الألكانِ.*** وتتمُّ

الجدول 4-10 بعضُ مجموعاتِ ألكيلِ السلسلةِ المستقيمةِ (غيرِ المتفرِّعةِ)

الألكان	الاسم	مجموعةُ الألكيل	الاسم
CH_4	ميثان	$-CH_3$	ميثيل
CH_3-CH_3	إيثان	$-CH_2-CH_3$	إيثيل
$CH_3-CH_2-CH_3$	بروبان	$-CH_2-CH_2-CH_3$	بروبيل
$CH_3-CH_2-CH_2-CH_3$	بيوتان	$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	بيوتيل
$CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	بنتان	$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	بنتيل

تسميةُ مجموعاتِ الألكيل بأن نضعَ مكانَ المقطعِ –ان (–ane) للألكانِ المقطعَ –يل (–yl) كما هو موضَّحٌ في الجدول 4-10. تُستخدمُ أسماءُ مجموعاتِ الألكيل لدى تسميةِ ألكاناتِ السلسلةِ المتفرِّعةِ. وستردُ هنا طريقةُ تسميةِ ألكاناتِ السلسلةِ المتفرَّعةِ البسيطةِ مع مجموعاتِ ألكيلٍ ذاتِ سلسلةٍ مستقيمةٍ فقطْ. تأمَّلِ الجزيءَ التاليَ.

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\quad CH_3\ CH_3 \\ CH_3-CH_2-CH_2-CH-CH-CH-CH_2-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ \ CH-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ \ CH_3 \end{array}$$

لتسميةِ هذا المركَّبِ حدِّدِ الهيدروكربونَ الأمَّ. ويعني ذلك السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ والمحتويةَ على تفرُّعاتٍ أكثرَ ذاتِ سلسلةٍ مستقيمةٍ. في هذا الجزيءِ يوجدُ سلسلتان تتكوَّنُ كلٌّ منهما من ثماني ذرّاتِ كربونٍ، والهيدروكربونُ الأمُّ يتمثَّلُ في السلسلةِ المحتويةِ على أكبرِ عددٍ من التفرُّعاتِ ذاتِ السلسلةِ المستقيمةِ. وهنا لا تُخدعْ بالطريقةِ التي يُرسمُ بها الجزيءُ. فالسلسلةُ الأطولُ قد تكونُ منحنيةً وليسَتْ مستقيمةً، كما يلي:

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\quad CH_3\ CH_3 \\ CH_3-CH_2-CH_2-CH-CH-CH-CH_2-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ \ CH-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ \ CH_3 \end{array}$$

وليس

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\quad CH_3\ CH_3 \\ CH_3-CH_2-CH_2-CH-CH-CH-CH_2-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ \ CH-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad\quad\ \ CH_3 \end{array}$$

ولتسميةِ الهيدروكربونِ الأمِّ، أضفِ المقطعَ –ان إلى البادئةِ أوكت– (نسبةً إلى سلسلةِ ذرّاتِ الكربونِ المكوَّنةِ من ثماني ذرّاتٍ)، فتصبحُ أوكتان. والآنَ حدِّدْ مجموعاتِ الألكيلِ وسمِّها.

$$
\begin{array}{l}
\qquad\qquad\qquad\quad CH_3\ CH_3 \\
CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}CH{-}CH{-}CH{-}CH_2{-}CH_3 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\quad CH{-}CH_3 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\quad CH_3
\end{array}
$$

لاحظْ أن مجموعـاتِ CH_3– الـثلاثَ مجموعـاتُ ميثيل، وأن مجموعةَ $-CH_2-CH_3$ مجموعةُ إيثيلٍ. رتِّبِ الأسماءَ بحسبِ الأبجديَّةِ الإنجليزيَّةِ أمامَ اسمِ الهيدروكربونِ الأمِّ.

ethyl methyloctane   **إيثيل ميثيل** أوكتان

ولتبيِّنَ أن هنالك ثلاثَ مجموعاتِ ميثيلٍ، أضفِ البادئةَ «ثلاثيّ» إلى ميثيل ليصبحَ ثلاثيَّ ميثيل، ويصبحُ الاسمُ:

إيثيل **ثلاثي** ميثيل أوكتان

ولتُظهرَ مواقعَ مجموعاتِ الألكيلِ على الهيدروكربونِ الأمِّ، رقِّمْ سلسلةَ الأوكتانِ بحيث يُصبحُ لمجموعاتِ الألكيلِ أصغرُ أعدادٍ ممكنةٍ.

$$
\begin{array}{l}
\qquad\qquad\qquad\quad CH_3\ CH_3 \\
\overset{8}{C}H_3{-}\overset{7}{C}H_2{-}\overset{6}{C}H_2{-}\overset{5}{C}H{-}\overset{4}{C}H{-}\overset{3}{C}H{-}CH_2{-}CH_3 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\ \ {}^{2}CH{-}CH_3 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\ \ {}^{1}CH_3
\end{array}
$$

وليس

$$
\begin{array}{l}
\qquad\qquad\qquad\quad CH_3\ CH_3 \\
\overset{1}{C}H_3{-}\overset{2}{C}H_2{-}\overset{3}{C}H_2{-}\overset{4}{C}H{-}\overset{5}{C}H{-}\overset{6}{C}H{-}CH_2{-}CH_3 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\ \ {}^{7}CH{-}CH_3 \\
\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\ \ {}^{8}CH_3
\end{array}
$$

ضعْ أرقامَ مواقعِ كلِّ مجموعةِ ألكيلٍ أمامَ اسمِه، وافصلِ الأرقامَ عن أسماءِ مجموعاتِ الألكيلِ بشَرْطةٍ. فمجموعةُ الإيثيلِ الواقعةُ على الكربونِ 3 يعبَّرُ عنها:

3-إيثيل ثلاثي ميثيل أوكتان

وبما أن هناك ثلاثَ مجموعاتِ ميثيلٍ فسيكونُ هناك ثلاثةُ أرقامٍ مفصولةٍ عن بعضِها بفواصلَ أمامَ ثلاثي ميثيل.

3-إيثيل-**2،4،5**-ثلاثي ميثيل أوكتان

ويصبحُ الاسمُ الكاملُ: 3-إيثيل-2،4،5-ثلاثي ميثيل أوكتان.

ويمكنُ اختصارُ الطريقةِ التي تُسمّى بها ألكاناتُ السلسلةِ المتفرِّعةِ البسيطةِ كما هو مبيَّنٌ في القائمةِ التاليةِ.

تسميةُ الألكانات

1. سمِّ الهيدروكربونَ الأمَّ. جدِ السلسلةَ الكربونيَّةَ المستمرَّةَ الأطولَ والتي تحتوي على تفرُّعاتٍ ذاتِ سلسلةٍ مستقيمةٍ. أضفِ المقطعَ -ان (ane–) إلى البادئةِ المطابقةِ لعددِ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ.

الكيمياءُ تطبيقيًا

مهندسُ البترولِ

يبحثُ مهندسو البترولِ عن احتياطيِّ النفطِ والغازِ ويعملون بعدئذٍ مع علماءَ ومهندسينَ آخرينَ على تطويرِ عمليّاتِ الحفرِ والإنتاجِ. ومن مسؤوليَّةِ مهندسي البترولِ أيضًا تطويرُ تقنيّاتٍ وطرقٍ لزيادةِ كمِّيّاتِ النفطِ والغازِ المُنتجةِ، وتقليلِ كلفةِ الحفرِ وعمليّاتِ الإنتاجِ. وبالإضافةِ إلى امتلاكِ مهندسِ البترولِ خبراتٍ هندسيَّةً واسعةً (في مجالاتِ الكيمياءِ، والميكانيكِ، والكهرباءِ) عليه أيضًا أن يطبِّقَ المعارفَ الأساسيَّةَ في علمِ الكيمياءِ والجيولوجيا والفيزياءِ والرياضيّاتِ. ونظرًا لأن النفطَ يمثِّلُ المصدرَ الأوَّلَ للدخلِ الوطنيِّ في دولةِ الإماراتِ، فإن مهنةَ مهندسِ البترولِ تكتسبُ أهميَّةً خاصَّةً، ذلك أنها تتيحُ للمواطنِ الفرصةَ للعملِ في فرعٍ من فروعِ التنميةِ الوطنيَّةِ.

2. **أضفْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيل.** تُضافُ هذه الأسماءُ أمامَ اسمِ الهيدروكربونِ الأمِّ وبحسبِ تسلسلِ الأبجديَّةِ الإنجليزيَّةِ. وعندَ وجودِ أكثرَ من تفرُّعٍ لمجموعةِ الألكيلِ نفسِها، أضفِ البادئةَ العدديَّةَ الملائمةَ إلى الاسمِ، ثنائيٌّ = 2، ثلاثيٌّ = 3، رباعيٌّ = 4، وهكذا. أضفِ البادئاتِ هذه بعدَ ترتيبِ الأسماءِ بحسبِ الأبجديَّةِ الإنجليزيَّةِ.
3. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الهيدروكربونِ الأمِّ.** لدى وجودِ مجموعةِ ألكيلٍ واحدةٍ أو أكثرَ، رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ المستمرَّةِ لتعطيَ مجموعاتِ الألكيلِ أصغرَ أرقامٍ ممكنةٍ في الاسمِ. وإذا وُجِدَ موقعانِ يحملانِ أقلَّ عددٍ، لكن بنوعَيْ ألكيلٍ مختلفَين، أعطِ الرقمَ الأصغرَ لمجموعةِ الألكيلِ التي تأتي أولاً في الاسمِ. (وهي مجموعةُ الألكيلِ التي يتقدَّمُ اسمُها أبجديًّا.)
4. **ضعْ أرقامَ المواقعِ.** ضعْ أرقامَ المواقعِ لكلِّ مجموعةِ ألكيلٍ في مقدِّمةِ اسمِ تلكَ المجموعةِ.
5. **ضعِ الشرطاتِ والفواصلَ.** استخدمِ الشَّرطةَ لفصلِ أرقامِ المواقعِ عن الأسماءِ. وإذا وُجِدَ أكثرُ من رقمٍ واحدٍ في مقدِّمةِ الاسمِ، استخدمِ الفواصلَ لفصلِ الأرقامِ عن بعضِها.

مسألةٌ نموذجية 1-10

اكتبِ اسمَ الألكانِ التالي:

$$CH_3-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_3$$

الحلّ

1. حدِّدِ اسمَ الهيدروكربونِ الأمِّ.

$$CH_3-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_3$$

وبما أن السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ تحتوي على ستِّ ذرّاتِ كربونٍ، فسوفَ يكونُ الهيدروكربونُ الأمُّ هكسان.

2. حدِّدْ مجموعاتِ الألكيلِ المتَّصلةِ بالسلسلةِ وسمِّها.

$$CH_3-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}-CH_3$$

هناك نوعٌ واحدٌ فقطْ من الألكيلِ الذي يحتوي على ذرَّةِ كربونٍ واحدةٍ، هو مجموعةُ الميثيل. أضفِ الاسمَ «ميثيل» إلى مقدِّمةِ اسمِ السلسلةِ المستمرَّةِ، ثم أضفِ البادئةَ «ثلاثيّ» لتبيِّنَ وجودَ ثلاثِ مجموعاتِ ميثيلٍ:

ثلاثيّ ميثيل هكسان

3. رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ المستمرَّةِ، بحيثُ تأخذُ مجموعاتُ الألكيلِ الأرقامَ الأصغرَ المحتملةَ.

$$\overset{6}{CH_3}-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{\overset{5}{CH}}}-\overset{4}{CH_2}-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{\overset{3}{CH}}}-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{\overset{2}{CH}}}-\overset{1}{CH_3}$$

4. تقعُ مجموعاتُ الميثيلِ على ذرّاتِ الكربونِ المرقّمةِ 2، 3، 5. ضعْ أرقامَ المواقعِ لمجموعاتِ الألكيلِ مفصولةً بفواصلَ، في مقدمّةِ اسمِ مجموعةِ الألكيلِ، وافصلِ الأرقامَ عن الاسمِ بشَرْطةٍ.

5،3،2-ثلاثيّ ميثيل هكسان

يصبحُ الاسمُ الكاملُ 5،3،2-ثلاثيّ ميثيل هكسان.

مسألةٌ نموذجية 2-10

ارسمِ الصيغةَ البنائيّةَ المختصرةَ لـ 3-إيثيل-4-ميثيل هكسان.

الحلّ

1. حدِّدْ اسمَ الهيدروكربونِ الأمِّ.

3-إيثيل-4-ميثيل **هكسان**

الهيدروكربونُ الأمُّ هو الهكسان. أي هناك ستُّ ذرّاتِ كربونٍ في السلسلةِ. ارسمْ ذرّاتِ الكربونِ ورقِّمْها.

$$\overset{1}{C}-\overset{2}{C}-\overset{3}{C}-\overset{4}{C}-\overset{5}{C}-\overset{6}{C}$$

2. حدِّدْ مجموعاتِ الألكيلِ، ثم حدِّدْ عددَ ذرّاتِ الكربونِ في مجموعاتِ الألكيلِ.

3-**إيثيل**-4-**ميثيل** هكسان

فلمجموعةِ الميثيلِ ذرّةُ كربونٍ واحدةٍ ولمجموعةِ الإيثيلِ ذرّتا كربونٍ.

$$-CH_3 \qquad -CH_2-CH_3$$

3. حدِّدْ رقمَ موقعِ كلٍّ من الإيثيلِ والميثيلِ.

3-إيثيل-**4**-ميثيل هكسان

ارسمْ مجموعاتِ الألكيلِ على الهيدروكربونِ الأمِّ في المواقعِ الصحيحةِ.

$$\overset{1}{C}-\overset{2}{C}-\underset{\underset{CH_3}{|}\atop CH_2}{\overset{3}{C}}-\overset{CH_3}{\overset{|}{\overset{4}{C}}}-\overset{5}{C}-\overset{6}{C}$$

4. أضفْ عددَ ذرّاتِ الهيدروجينِ الصحيحةِ، بحيثُ تحتوي كلُّ ذرَّةِ كربونٍ على أربعةِ روابطَ أحاديَّةٍ. فتصبحُ الصيغةُ البنائيَّةُ الكاملةُ وغيرُ المختصرةِ كالتالي:

$$CH_3-CH_2-CH(CH_2CH_3)-CH(CH_3)-CH_2-CH_3$$

5. لرسمِ الصيغةِ البنائيَّةِ المختصرةِ، أظهِرِ الروابطَ بين ذرّاتِ الكربونِ فقطْ، كالتالي:

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\qquad\qquad CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad | \\ CH_3-CH_2-CH-CH-CH_2-CH_3 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\quad CH_2 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\quad CH_3 \end{array}$$

تمارينُ تطبيقية

1. اكتبِ اسمَ الجزيءَ التالي:

$$\begin{array}{l} CH_3-CH-CH_2-CH_3 \\ \qquad\quad | \\ \qquad\quad CH_3 \end{array}$$

2. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لـ 3،3–ثنائي إيثيل–5،2–ثنائي ميثيل نونان.

3. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ للأيزومرَيْن البنائيَّيْن لميثيل بنتان ثمَّ سمِّ هذَيْن الأيزومرَين.

الجواب

1. 2–ميثيل بيوتان

2.

$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\quad CH_3 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\quad CH_2 \\ \qquad\qquad\quad | \\ CH_3-CH-C-CH_2-CH-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3 \\ \qquad\quad | \qquad | \qquad\qquad\quad | \\ \qquad CH_3\ CH_2 \qquad\quad CH_3 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\quad CH_3 \end{array}$$

3.

$$\begin{array}{l} CH_3-CH-CH_2-CH_2-CH_3 \\ \qquad\quad | \\ \qquad\quad CH_3 \end{array}$$

2–ميثيل بنتان

$$\begin{array}{l} CH_3-CH_2-CH-CH_2-CH_3 \\ \qquad\qquad\quad | \\ \qquad\qquad\quad CH_3 \end{array}$$

3–ميثيل بنتان

تسميةُ الألكاناتِ الحلقيَّةِ

في تسميةِ الألكاناتِ الحلقيَّةِ البسيطةِ تكونُ الألكاناتُ الحلقيَّةُ نفسُها هي الهيدروكربوناتُ الأمُّ. تُسمّى الألكاناتُ الحلقيَّةُ بإضافةِ كلمةِ «حلقيٌّ» cyclic إلى اسمِ ألكانِ السلسلةِ المستقيمةِ، مع عددِ الهيدروكربوناتِ نفسِه.

$$CH_3-CH_2-CH_3$$

بروبان

$$\begin{array}{c} CH_2 \\ / \quad \backslash \\ CH_2 - CH_2 \end{array}$$

بروبان حلقيّ

وإذا وُجدَتْ مجموعةُ ألكيلٍ واحدةٌ مرتبطةٌ بالحلقةِ، فلا حاجةَ إلى رقمِ الموقعِ. لكن إذا وُجدَ أكثرُ من مجموعةِ ألكيلٍ مرتبطةٍ بالحلقةِ، فتُرقَّمُ ذرّاتُ الكربونِ في الحلقةِ، لإعطاءِ أصغرِ رقمٍ ممكنٍ لمجموعاتِ الألكيلِ. هذا يعني أن إحدى مجموعاتِ الألكيلِ ستبقى دائمًا في الموقعِ 1.

الشكل 10-12 يحتوي شمعُ البارافينِ المستخدمُ في شموعِ الإضاءةِ على ألكاناتٍ صلبةٍ. وتحتوي جزيئاتُ شمعِ البارافينِ على 26 إلى 30 ذرّةَ كربونٍ.

1،3–ثنائيّ ميثيل هكسان حلقي ~~1،5–ثنائيّ ميثيل هكسان حلقي~~

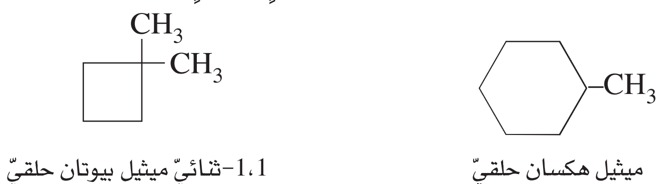
يمكنُ اختصارُ قواعدِ تسميةِ الألكاناتِ الحلقيَّةِ كما يلي:

تسميةُ الألكاناتِ الحلقيَّةِ

استخدمْ قواعدَ تسميةِ الألكاناتِ على الصفحةِ 280-281 مع الاستثناءاتِ التاليةِ:

1. **سمِّ الهيدروكربونَ الأمَّ.** عدَّ ذرّاتِ الكربونِ في الحلقةِ، وأضفِ كلمةَ «حلقيّ» (cyclic) إلى اسمِ ألكانِ السلسلةِ المستقيمةِ.
2. **أضفْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيلِ.**
3. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الهيدروكربونِ الأمِّ.** إذا وُجِدَتْ مجموعتا ألكيلٍ مرتبطتانِ بالحلقةِ، رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الحلقةِ، بوضعِ الرقمِ 1 لموقعِ مجموعةِ الألكيلِ التي تأتي أوّلاً، بحسبِ الأبجديَّةِ الإنجليزيَّةِ ثم رقِّمْ في الاتِّجاهِ الذي يُعطي لمجموعةِ الألكيلِ الثانيةِ أصغرَ رقمٍ ممكنٍ. وإذا وُجِدَتْ عدَّةُ مجموعاتِ ألكيلٍ مرتبطةٌ بالحلقةِ، رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الحلقةِ، بوضعِ أصغرِ رقمٍ ممكنٍ لمجموعاتِ الألكيلِ.
4. **ضعْ أرقامَ المواقعِ.**
5. **ضعِ الشرطاتِ والفواصلَ.**

تجدُ أدناهُ مثالَين على ألكاناتٍ حلقيَّةٍ سُمِّيَتْ بشكلٍ صحيحٍ.



ميثيل هكسان حلقيّ — 1،1–ثنائيّ ميثيل بيوتان حلقيّ

خصائصُ الألكاناتِ واستخداماتُها

تأمَّلِ الجدولَ 10-5 ثمَّ حاولْ أن تتوصَّلَ إلى العلاقةِ بينَ الكتلةِ الجزيئيَّةِ للألكاناتِ وخصائصِها الفيزيائيَّةِ.

تتوقَّفُ الخصائصُ الفيزيائيَّةُ للألكانِ على كتلتِهِ الجزيئيَّةِ. فكلما قلَّتِ الكتلةُ الجزيئيَّةُ يوجدُ الألكانُ في الحالةِ الغازيَّةِ، كما في المركَّباتِ الأربعةِ الأولى، والتي تُعدُّ المكوِّناتِ الرئيسةَ للغازِ الطبيعيِّ. ويرجعُ ذلك إلى ضعفِ قوى تشتُّتِ لندن بين جزيئاتِها. وتزيدُ قوى تشتُّتُ لندن بزيادةِ الكتلةِ الجزيئيَّةِ، وهذا ما يفسِّرُ وجودَ الألكاناتِ المحتويةِ على عددِ ذرّاتِ كربونٍ من 5-10 في الحالةِ السائلةِ، كما في الجازولينِ والكيروسين. أما ما زادَ عن ذلك فيوجدُ في الحالةِ الصلبةِ كشمعِ البارافينِ المبيَّنِ في الشكلِ 10-12. كذلك يرجعُ ارتفاعُ درجةِ الغليانِ للألكانِ كلَّما زادَتْ كتلتُه الجزيئيَّةُ إلى زيادةِ قوى تشتُّتِ لندن بزيادةِ الكتلةِ الجزيئيَّةِ. كما أنه بزيادةِ التفرُّعِ في الألكانِ تنخفضُ درجةُ غليانِهِ لأن زيادةَ التفرُّعِ تقلِّلُ من مساحةِ السطحِ، وتقلُّ قوى تشتُّتِ لندن. ومثالٌ على ذلك: درجةُ غليانِ البنتانِ 36.1°C، في حينِ أن درجةَ غليانِ 2–ميثيل بيوتان 27.9°C ودرجة غليان 2،2–ثنائي ميثيل بروبان 9.45°C.

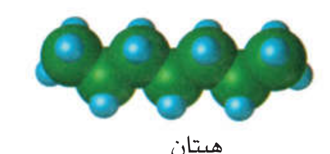
الشكل 10-13 صورةٌ لمصفاةِ النفطِ في الرويس.

الجدول 10-5 خصائصُ ألكاناتِ السلسلةِ المستقيمةِ

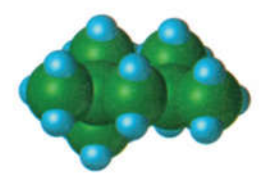
الصيغةُ الجزيئيَّةُ	الاسمُ بحسبِ IUPAC	درجةُ الغليانِ (°C)	حالةُ المادَّةِ عندَ درجةِ حرارةِ الغرفةِ
CH_4	ميثان	–164	غاز
C_2H_6	إيثان	–88.6	
C_3H_8	بروبان	–42.1	
C_4H_{10}	بيوتان	–0.5	
C_5H_{12}	بنتان	36.1	سائل
C_8H_{18}	أوكتان	125.7	
$C_{10}H_{22}$	ديكان	174.1	
$C_{17}H_{36}$	هبتاديكان	301.8	صلب
$C_{20}H_{42}$	إيكوسان	343	

من أهمِّ استخداماتِ الألكاناتِ الشائعةِ في الحياةِ توظيفُها كوقودٍ سواءٌ أكانَ **الغازَ الطبيعيَّ natural gas** *الذي يعرفُ أنه وقودٌ أحفوريٌّ يتكوَّنُ أساسًا من هيدروكربوناتٍ تحتوي في تركيبِها على ذرَّةٍ واحدةٍ إلى أربعِ ذرّاتِ كربونٍ،* أو **البترولَ petroleum** *وهو مزيجٌ معقَّدٌ من هيدروكربوناتٍ مختلفةٍ تتباينُ في مكوِّناتِها.* ويعدُّ البترولُ المصدرَ الأوَّلَ للدخلِ الوطنيِّ في دولةِ الإماراتِ العربيَّةِ المتَّحدةِ. وفي الشكلِ 10-13 صورةٌ لمصفاةِ النفطِ في الرويسِ.

ومن المؤشّراتِ الدّالةِ على جودةِ الوقودِ ما يُعرفُ **برقمِ الأوكتانِ octane rating** *والذي يعدُّ مقياسًا لكفاءةِ احتراقِ الوقودِ وخصائصِ الخبطِ فيه.* يعتمدُ مقياسُ رقمِ الأوكتانِ على خليطٍ يتكوَّنُ من 2،2،4–ثلاثيّ ميثيل بنتان، أو ما يُعرفُ بالأيزو أوكتان isooctane، وهو ألكانٌ كثيرُ التفرُّعِ. والهبتانِ ألكانٌ سلسلةٍ مستقيمةٍ. ونظرًا لسهولةِ احتراقِ الأيزو أوكتان وإحداثِهِ خبطًا قليلاً في المحرِّكِ أُعطيَ رقمَ أوكتان 100. بينما أُعطيَ الهبتانُ رقمَ أوكتان 0، لإحداثِهِ خبطًا عاليًا أثناءَ احتراقِهِ. وبزيادةِ الألكاناتِ المتفرِّعةِ في الوقودِ يرتفعُ رقمَ الأوكتانِ له، وبالتالي تزدادُ جودتُه. ويظهرُ في الشكلِ 10-14 رقمُ الأوكتانِ على مضخَّةٍ لوقودِ الجازولينِ في إحدى محطّاتِ أدنوك في دولةِ الإماراتِ.



هبتان



2،2،4–ثلاثيّ ميثيل بنتان

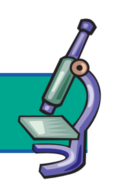
الشكل 10-14 يعتمدُ مقياسُ رقمِ الأوكتانِ على الرقمِ 100 الخاصِّ بـ 2،2،4–ثلاثيّ ميثيل بنتان، والرقمِ 0 الخاصِّ بالهبتانِ. قارنْ بينَ الأشكالِ الجزيئيَّةِ للمادَّتيْنِ.

مراجعةُ القسمِ 10-3

1. ما الخاصّيَّةُ البنائيَّةُ الأساسيَّةُ للألكاناتِ؟
2. ارسمْ جميعَ الصيغِ البنائيَّةِ المختصرةِ التي تمثِّلُ C_5H_{12}.
3. اكتبِ الاسمَ بحسبِ نظامِ IUPAC لكلٍّ من المركَّباتِ التي تظهرُ صيغُها في البندِ 2.
4. اربطْ بينَ خصائصِ بعضِ الألكاناتِ واستخداماتِها.
5. ارسمِ الصيغِ البنائيَّةَ المختصرةَ لـ:
   2–إيثيل–3–ميثيل بنتان
   و 1–ميثيل–3–بروبيل بنتان حلقيّ.

تفكيرٌ ناقدٌ

6. **تطبيقُ مفاهيم:** الأيزومراتُ البنائيَّةُ هي مركَّباتٌ لها صيغٌ جزيئيَّةٌ متماثلةٌ ولكن ترتبطُ الذرّاتُ فيها بنسقٍ مختلفٍ. أيٌّ من المركَّباتِ التاليةِ تمثِّلُ أيزومراتٍ بنائيَّةً: بنتان، بنتان حلقيّ، 2–ميثيل بنتان، ميثيل بيوتان حلقيّ، هكسان؟



قراءةٌ علميَّةٌ

الماسُ الصناعيُّ

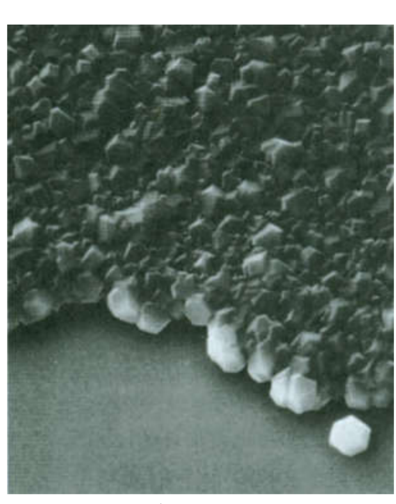
ماسٌ بحسبِ الطلبِ؟ لعلَّ وجودَ طبقةٍ رقيقةٍ خارجيَّةٍ من الماسِ لا تبدو جميلةً تمامًا، ولكنها توفِّرُ خصائصَ مفيدةً متعدِّدةً للصناعة. وقد تطوَّرَتْ طرقٌ متعدِّدةٌ ناجحةٌ وقليلةُ الكلفةِ للطلي بالماسِ. وإذا ما توفَّرَ لهذه التقنيّاتِ النجاحُ، فسوفَ يؤثِّرُ الطلاءُ بالماسِ في طريقةِ تصنيعِ المعدّاتِ، والحاوياتِ، ورقائقِ الكومبيوترِ، وموادَّ أخرى متعدِّدةٍ.

يقولُ جيمسُ أدايرُ أستاذُ علمِ الموادِّ المساعدُ في جامعةِ فلوريدا، إن «الماسَ الطبيعيَّ ناتجٌ من تعرُّضِ الكربون لدرجاتِ حرارةٍ مرتفعةٍ وضغوطٍ مرتفعةٍ جدًّا. وبما أنها عمليَّةٌ طبيعيَّةٌ فهي تستغرقُ ملايينَ السنينَ لتكوينِ الماسِ. لكننا نصنعُ الماسَ بظرفِ دقيقتَين». تتطلَّبُ الطريقةُ إلصاقَ دقائقِ ماسٍ صغيرةٍ جدًّا على سطوحٍ مختلفةٍ ثم يُستخدمُ ترسيبُ البخارِ الكيميائيِّ لترسيبِ مزيدٍ من الماسِ على حبّاتِهِ الأساسيَّةِ هذهِ.

في عمليَّةِ ترسيبِ البخارِ الكيميائيِّ، توضعُ حبّاتُ الماسِ التي يتوجَّبُ طلاؤُها داخلَ حجرةٍ مليئةٍ بالميثانِ وغازاتٍ أخرى. تُعرَّضُ الغازاتُ إلى أشعَّةٍ ميكرويَّةٍ تكسِّرها إلى هيدروجينٍ وكربون. تبدأُ بلَّوراتُ الماسِ بالنموِّ عندما تُغلِّفُ ذرّاتُ الكربونِ بلّوراتِ حبّاتِ الماسِ.

وهناك طريقةٌ أخرى للطلاءِ بالماسِ اخترعَها عالمُ الموادِّ برافن مستري، وذلك باستخدامِ الليزرِ في مسحِ الجسمِ المرادِ طلاؤُه. تسبِّبُ طاقةُ الليزرِ تكسُّرَ CO_2 (مصدرُهُ نظامُ توصيلِ الغازِ) إلى ذرّاتِ كربونٍ وأكسجينٍ، وتبخيرَ سطحِ الجسمِ، وتكوينَ بلازما فائقةِ السخونةِ. تجهِّزُ البلازما المحيطَ الملائمَ لربطِ ذرّاتِ الكربونِ بشكلِ طلاءٍ من الماسِ البلّوريِّ.

ومن أهمِّ التحدّياتِ التي تعترضُ الطلاءَ بالماسِ الصناعيِّ التأكُّدُ من أن الكربونَ يتبلَوَرُ بشكلٍ صحيحٍ لتكوينِ الماسِ



تبيِّنُ هذه الصورةُ، التي أُخذَتْ بالمجهرِ الإلكترونيِّ، الماسَ الصناعيَّ المصنَّعَ بطريقة ترسيبِ البخارِ الكيميائيِّ.

وليس الجرافيتَ. فالجرافيتُ مفيدٌ في عملِ المزيتاتِ ورؤوسِ أقلامِ الرصاصِ، لكنَّه ليسَ بصلابةِ الماسِ. إن المسافاتِ بينَ ذرّاتِ الكربونِ في التركيبِ الجزيئيِّ البلّوريِّ للجرافيتِ متباعدةٌ، ولا بدَّ من طريقةٍ تضغطُ هذه المسافاتِ لتكوينِ بلّوراتِ الماسِ ثمانيةِ الأوجهِ المضغوطةِ.

يُعدُّ الماسُ من أصلبِ ما عرفَهُ الإنسانُ من موادَّ. لذلك يكونُ الطلاءُ بالماسِ مفيدًا، وخصوصًا في صناعةِ معدّاتِ الآلاتِ، وسطوحِ العملِ، بالإضافةِ إلى تطبيقاتٍ أخرى تتطلَّبُ سطوحًا صلبةً لتوفيرِ الحمايةِ. كذلك يمتلكُ الماسُ أعلى قدرةِ توصيلٍ حراريٍّ معروفةٍ بين الموادِّ. هذا يعني أنه ينقلُ الحرارةَ بشكلٍ فعّالٍ جدًّا. بالطبعِ لن يعجبَكَ أن تشربَ الشايَ في كأسٍ مطليَّةٍ بالماسِ لأن الكأسَ ستسخنُ بسرعةٍ فتحرقُ شفَتَيك. من ناحيةٍ أخرى، فإنّ موصِّليَّةَ الماسِ العاليةَ للحرارةِ تجعلُه مفيدًا جدًّا في رقائقِ السيليكون الخاصَّةِ بالكومبيوترِ.

وعن الإلكترونيّاتِ الدقيقةِ يقولُ أداير: إن التعاملَ مع الحرارةِ المتولِّدةِ في الداراتِ الكهربائيَّةِ أمرٌ مهمٌّ جدًّا. فإذا تراكمَتِ الحرارةُ داخلَ الدارةِ السيليكونيَّةِ تصهرُ السيليكونَ فلا تكونُ صالحةً لعملِ الكومبيوترِ. بإمكانِ الماسِ أن يسحبَ الحرارةَ من رقيقةِ السيليكون مما يجعلُ الدارةَ الكهربائيَّةَ أقلَّ حرارةً. فإذا مُنعَتْ رقيقةُ الكومبيوترِ من السخونةِ الشديدةِ ستصبحُ قدرتُها على العملِ أسرعَ. وبذلك تقودُ الرقائقُ الأسرعُ إلى جيلٍ جديدٍ من الكومبيوتراتِ ذاتِ القدراتِ المرتفعةِ.

أسئلة

1. ما أهمُّ خصائصِ الماسِ المفيدةِ للصناعةِ؟

القسم 4-10

الهيدروكربوناتُ غيرُ المشبعةِ

مؤشّراتُ الأداءِ

- يميّزُ بينَ التراكيبِ البنائيَّةِ للألكيناتِ، والألكايناتِ، والهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ.
- يسمّي الهيدروكربوناتِ غيرَ المشبعةِ ويكتبُ صيغَها البنائيَّةَ.
- يفسِّرُ كيفَ تؤثِّرُ التراكيبُ البنائيَّةُ للهيدروكربوناتِ غيرِ المشبعةِ في خصائصِها، واستخداماتِها.

تُعرَّفُ الهيدروكربوناتُ التي لا تحتوي على الكميّةِ القصوى من الهيدروجينِ بالهيدروكربوناتِ غيرِ المشبعةِ. **الهيدروكربوناتُ غيرُ المشبعةِ unsaturated hydrocarbons** ***هيدروكربوناتٌ لا تحتوي جميعُ ذرّاتِ الكربونِ فيها على أربعِ روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ.***

الألكينات

الألكيناتُ alkenes ***هي الهيدروكربوناتُ التي تحتوي على روابطَ تساهميَّةٍ ثنائيَّةٍ.*** وفي الجدول 10-7 أمثلةٌ على الألكيناتِ. ومما تجدرُ ملاحظتُه أن الألكيناتِ، بسببِ احتوائِها على رابطةٍ ثنائيَّةٍ فإن أبسطَها، الإيثينُ، الذي يحتوي على ذرّتَيْ كربونٍ.

إن ذرّاتِ الكربونِ المرتبطةِ برابطةٍ ثنائيَّةٍ لا تتمكَّنُ من الارتباطِ بعددِ ذرّاتٍ يماثلُ العددَ الذي ترتبطُ به ذرّاتُ الكربونِ ذاتُ الروابطِ الأحاديَّةِ فقط. فالألكينُ ذو الرابطةِ الثنائيَّةِ الواحدةِ يحتوي على ذرّتَيْ هيدروجينٍ أقلَّ من الألكانِ المقابلِ.

```
      H                  H  H  H
      |                  |  |  |
H–C=C–C–H          H–C––C––C–H
  |  |  |              |  |  |
  H  H  H              H  H  H
```

C_3H_6 C_3H_8

لذلك تكونُ الصيغةُ العامَّةُ للألكيناتِ غيرِ الحلقيَّةِ ذاتِ الرابطةِ الثنائيَّةِ الواحدةِ: C_nH_{2n}.

الجدول 10-7 التركيبُ البنائيُّ للألكينات

	الإيثين	البروبين	ض-2-بيوتين	م-2-بيوتين
الصيغةُ البنائيَّةُ	$H_2C=CH_2$	$CH_3CH=CH_2$	$CH_3CH=CHCH_3$ (H و CH_3 في الجهة نفسها)	$CH_3CH=CHCH_3$ (CH_3 في جهتين متقابلتين)
نماذجُ الكراتِ والعيدانِ				

وبما أن للألكيناتِ رابطةً ثنائيَّةً واحدةً، فيكونُ لها أيزومراتٌ هندسيَّةٌ، كما هو مبيَّنٌ في المثال التالي:

$$\begin{array}{ccc} H & & CH_3 \\ & C=C & \\ CH_3 & & H \end{array} \qquad \begin{array}{ccc} H & & H \\ & C=C & \\ CH_3 & & CH_3 \end{array}$$

ض-2-بيوتين م-2-بيوتين

تسميةُ الألكيناتِ

تتشابهُ القواعدُ المستخدَمةُ لتسميةِ الألكيناتِ البسيطةِ مع القواعدِ المستخدمةِ لتسميةِ الألكاناتِ. ***الهيدروكربونُ الأمُّ هو السلسلةُ المستمرَّةُ الأطولُ لذرّاتِ الكربونِ التي تحتوي على رابطةٍ ثنائيَّةٍ.***

$$CH_2=\overset{\overset{CH_2-CH_3}{|}}{C}-CH_2-CH_2-CH_3$$

بنتين

وليس

$$CH_2=\overset{\overset{CH_2-CH_3}{|}}{C}-CH_2-CH_2-CH_3$$

~~هكسان~~

تُرقَّمُ ذرّاتُ الكربونِ في السلسلةِ بحيثُ تتَّخذُ ذرّةُ الكربونِ في الرابطةِ الثنائيَّةِ الرقمَ الأصغرَ. ويوضعُ الرقمُ الذي يؤشّرُ على موقعِ الرابطةِ الثنائيَّةِ، قبلَ اسمِ السلسلةِ الهيدروكربونيَّةِ ويُفصلُ بشَرْطةٍ.

$$\overset{1}{C}H_2=\overset{\overset{CH_2-CH_3}{2|}}{C}-\overset{3}{C}H_2-\overset{4}{C}H_2-\overset{5}{C}H_3$$

1-بنتين

يوضعُ بعدئذٍ رقمُ موقعِ مجموعةِ الألكيلِ واسمُها أمامَ رقمِ موقعِ الرابطةِ الثنائيَّةِ. لمجموعةِ الألكيلِ الحاليَّةِ ذرّتا كربونٍ، فهي مجموعةُ إيثيلٍ، وهي تقعُ على ذرَّةِ الكربونِ الثانيةِ من سلسلةِ الهيدروكربونِ الأمِّ.

2-إيثيل-1-بنتين

يصبحُ اسمُ الجزيءِ 2-إيثيل-1-بنتين.

وإذا وُجِدَ أكثرُ من رابطةٍ ثنائيَّةٍ واحدةٍ يُغيَّرُ المقطعُ ليحدِّدَ عددَ الروابطِ الثنائيَّةِ. -ديين (-adiene) = 2، -ترين (-atriene) = 3، وهكذا.

$$CH_2=CH-CH_2-CH=CH_2$$

4،1-بنتاديين

وإذا أدى ترقيمُ كلا الطرفينِ إلى رقمٍ متشابهٍ لموقعِ الرابطةِ الثنائيَّةِ في الألكينِ ذي الرابطتَينِ الثنائيَّتَيْنِ، تُرقَّمُ السلسلةُ من النهايةِ الأقربِ إلى مجموعةِ الألكيلِ الأولى.

$$CH_2=\overset{\overset{CH_3}{|}}{C}-CH=CH_2$$

2-ميثيل-3،1-بيوتاديين

يمكنُ اختصارُ طريقةِ تسميةِ الألكيناتِ بما يلي:

تسميةُ الألكيناتِ

استخدمْ قواعدَ تسميةِ الألكاناتِ على الصفحتيْن 280-281، مع الاستثناءاتِ التاليةِ:

1. **سمِّ الهيدروكربونَ الأمَّ.** حدِّدْ موقعَ السلسلةِ المستمرَّةِ الأطولِ والتي تحتوي على رابطةٍ ثنائيَّةٍ أو أكثرَ. وإذا وُجِدَتْ رابطةٌ ثنائيَّةٌ واحدةٌ، أضفِ المقطعَ -ين (ene–) إلى البادئةِ المطابقةِ لعددِ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ. وإذا وُجِدَ أكثرُ من رابطةٍ ثنائيَّةٍ واحدةٍ، تضافُ ألفٌ إلى البادئةِ المطابقةِ لعددِ ذرّاتِ الكربونِ، ثمّ المقطعُ المناسبُ لتحديدِ عددِ الروابطِ الثنائيَّةِ، فعلى سبيلِ المثالِ، -داين (adiene-) = 2، -ترايين (atriene-) = 3، وهكذا.
2. **أضفْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيلِ.**
3. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الهيدروكربونِ الأمِّ.** رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ بحيثُ تتّخذُ ذرَّةُ الكربونِ الأولى، في الرابطةِ الثنائيَّةِ القريبةِ إلى نهايةِ السلسلةِ الرقمَ الأصغرَ. وإذا أعطى الترقيمُ من كلا الطرفَين مواقعَ متساويةً للرابطتَين الثنائيَّتَيْن، أجرِ عمليَّةَ الترقيمِ عندئذٍ من النهايةِ القريبةِ لمجموعةِ الألكيلِ الأولى.
4. **ضعْ أرقامَ المواقعِ.** ضعْ أرقامَ مواقعِ الروابطِ الثنائيَّةِ مباشرةً قبل اسمِ ألكينِ الهيدروكربونِ الأمِّ. ضعْ أرقامَ مواقعِ مجموعاتِ الألكيلِ مباشرةً، قبل اسمِ مجموعةِ الألكيلِ المقابلةِ.
5. **ضعِ الشَرْطاتِ والفواصلَ.**

مسألةٌ نموذجية 3-10

سمِّ الألكينَ التاليَ:

$$\begin{array}{l} \quad\quad\;\; CH_3 \\ \quad\quad\;\;\; | \\ CH_3\text{–}CH\text{–}C{=}CH_2 \\ \quad\quad\quad\quad\; | \\ \quad\quad\quad\;\; CH_2\text{–}CH_3 \end{array}$$

الحلّ

1. حدِّدِ اسمَ الهيدروكربونِ الأمِّ.

$$\begin{array}{l} \quad\quad\;\; CH_3 \\ \quad\quad\;\;\; | \\ CH_3\text{–}CH\text{–}C{=}CH_2 \\ \quad\quad\quad\quad\; | \\ \quad\quad\quad\;\; CH_2\text{–}CH_3 \end{array}$$

للهيدروكربونِ الأمِّ أربعُ ذرّاتِ كربونٍ ورابطةٌ ثنائيَّةٌ واحدةٌ، فاسمُه إذن بيوتين.

2. حدِّدْ مجموعاتِ الألكيلِ وسمِّها.

$$\begin{array}{l} \quad\quad\;\; CH_3 \\ \quad\quad\;\;\; | \\ CH_3\text{–}CH\text{–}C{=}CH_2 \\ \quad\quad\quad\quad\; | \\ \quad\quad\quad\;\; CH_2\text{–}CH_3 \end{array}$$

مجموعتا الألكيلِ هما الإيثيلُ والميثيلُ.

ضعْ اسمَيْ مجموعتَي الألكيلِ أمامَ اسمِ الهيدروكربونِ الأمِّ بحسبِ الأبجديَّةِ الإنجليزيَّةِ.

إيثيل ميثيل بيوتين **ethyl methyl** butene

3. رقِّمْ سلسلةَ الكربونِ لتتّخذَ الرابطةُ الثنائيَّةُ الموقعَ ذا الرقمِ الأصغرِ.

$$\begin{array}{l} \quad\;\; CH_3 \\ \;\;4\quad\; 3|\quad 2\quad 1 \\ CH_3-CH-C=CH_2 \\ \qquad\quad\;\; | \\ \qquad\quad CH_2-CH_3 \end{array}$$

4. ضعْ رقمَ موقعِ الرابطةِ الثنائيَّةِ أمامَ البيوتين. ضعْ رقمَ موقعِ كلٍّ من مجموعتَي الألكيلِ أمامَ كلِّ مجموعةٍ منهما. افصلِ الأرقامَ عن الاسمِ بشَرْطةٍ.

ترقَّمُ ذرَّةُ الكربونِ الأولى في الرابطةِ الثنائيَّةِ 1.

تقعُ مجموعاتُ الإيثيلِ على ذرَّةِ الكربونِ رقم 2.

تقعُ مجموعاتُ الميثيلِ على ذرَّةِ الكربونِ رقم 3.

2-إيثيل-**3**-ميثيل-**1**-بيوتين

يصبحُ الاسمُ الكاملُ 2-إيثيل-3-ميثيل-1-بيوتين.

تمارينُ تطبيقية

1. سمِّ الألكيناتِ التاليةَ:

$$CH_3-CH_2-CH_2-CH=CH-CH_3$$

2. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لـ 4-ميثيل-1، 3-بنتادايين.

3. سمِّ الألكيناتِ التاليةَ:

أ.
$$\begin{array}{l} \qquad\qquad\;\; CH_3 \\ \qquad\qquad\quad | \\ CH_3-CH=C-CH_3 \end{array}$$

ب.
$$\begin{array}{l} \quad\;\; CH_3 \\ \quad\;\; | \\ CH_3-CH-CH=CH-CH_2-CH_3 \end{array}$$

الجواب

1. 2-هكسين

2.
$$\begin{array}{l} CH_2=CH-CH=C-CH_3 \\ \qquad\qquad\qquad\; | \\ \qquad\qquad\quad\; CH_3 \end{array}$$

3. أ. 2-ميثيل-2-بيوتين

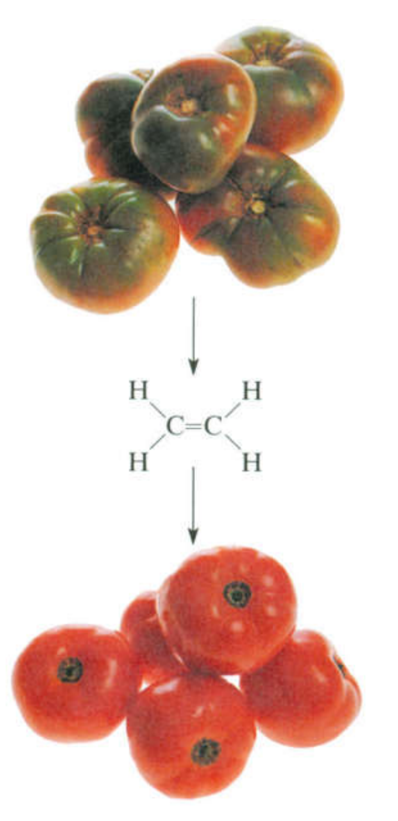
ب. 2-ميثيل-3-هكسين

خصائصُ الألكيناتِ واستخداماتُها

الألكيناتُ موادُّ غيرُ قطبيَّةٍ تُظهرُ في خصائصِها ميولاً مشابهةً للألكاناتِ من حيثُ درجاتُ الغليانِ والحالاتُ الفيزيائيَّةُ. فعلى سبيلِ المثالِ، يوجدُ للألفا-فارنيسين، 15 ذرَّةَ كربونٍ و 4 روابطَ ثنائيَّةٍ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 10-15. وإن هذا الألكين صلبٌ عندَ درجةِ حرارةِ الغرفةِ وتحت الضغطِ الجويِّ العاديِّ. وتوجدُ هذه المادَّةُ في الشمعِ الطبيعيِّ المغلِّفِ لثمرةِ التفّاحِ. أما الإيثينُ، الذي يُعدُّ أصغرَ ألكينٍ، فهو غازٌ اسمُه الشائعُ الإيثيلينُ.

الشكل 10-15 إن ألفا-فارنيسين هو ألكينٌ صلبٌ موجودٌ في الشمعِ الطبيعيِّ الذي يغطّي ثمرةَ التفاحِ. هل بإمكانِك تسميةُ IUPAC لهذا الألكينِ الكبيرِ؟

فالإيثينُ هيدروكربونٌ يُنتَجُ تجاريًّا بكمِّيّاتٍ كبيرةٍ، ويُستخدَمُ في تصنيعِ أنواعٍ من البلاستيكِ والكحولِ التجاريِّ. ويعدُّ الإيثينُ هرموناً نباتيًّا مُهمًّا يحفِّزُ التزهيرَ وإنضاجَ الفواكهِ كما يظهرُ في الشكلِ 10-16.



الشكل 10-16 الإيثينُ هرمونٌ نباتيٌّ يحفِّزُ إنضاجَ الثمارِ.

الألكاينات

الألكاينات alkynes ***هي الهيدروكربونات التي تحتوي على روابطَ تساهميَّةٍ ثلاثيَّةٍ.*** وكما في الروابطِ الثنائيَّةِ في الألكيناتِ، تستلزمُ الروابطُ الثلاثيَّةُ في الألكايناتِ أن يحتويَ أبسطُ ألكاينٍ على ذرّتَيْ كربونٍ.

$$H-C\equiv C-H$$

إيثاين

إن الصيغةَ العامَّةَ للألكايناتِ هي C_nH_{2n-2}. يقلُّ الألكاينُ أربعَ ذرّاتِ هيدروجينٍ عن الألكانِ المقابلِ، وذرّتَيْ هيدروجينٍ عن الألكينِ المقابلِ. وأبسطُ ألكاينٍ هو الإيثاينُ الذي يُعرفُ أيضًا بالأسيتيلين.

$H-C\equiv C-H$	$H_2C=CH_2$	H_3C-CH_3
C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6

تسميةُ الألكايناتِ

تشبهُ طريقةُ تسميةِ الألكاين إلى حدٍّ بعيدٍ طريقةَ تسميةِ الألكين. والفرقُ الوحيدُ هو في وضعِ المقطعِ –اين (yne–) محلَّ المقطعِ –ين (ene–) في سلسلةِ الألكينِ المقابلةِ. وفيما يلي قائمةٌ بالقواعدِ المستخدمةِ للتسميةِ.

تسميةُ الألكايناتِ

استخدمْ قواعدَ تسميةِ الألكاناتِ على الصفحتيْن 280-281 مع الاستثناءاتِ التاليةِ:

1. **سمِّ الهيدروكربونَ الأمَّ.** حدِّدْ موقعَ السلسلةِ المستمرَّةِ الأطولِ التي تحتوي على رابطةٍ ثلاثيَّةٍ أو أكثرَ. إذا وُجِدَتْ رابطةٌ ثلاثيَّةٌ واحدةٌ، أضفِ المقطعَ –اين (yne–) إلى البادئةِ المطابقةِ لعددِ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ.
2. **أضفْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيل.**
3. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الهيدروكربونِ الأمّ.** رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ بحيثُ تتَّخذُ ذرَّةُ الكربونِ الأولى، في الرابطةِ الثلاثيَّةِ القريبةِ إلى نهايةِ السلسلةِ، الرقمَ الأصغرَ. وإذا أعطى الترقيمُ من كلا الطرفَين مواقعَ متساويةً للرابطتَين الثلاثيَّتَيْن، أجرِ عمليَّةَ الترقيمِ من النهايةِ القريبةِ لمجموعةِ الألكيل الأولى.
4. **ضعْ أرقامَ المواقع.** ضعْ أرقامَ مواقعِ الروابطِ الثلاثيَّةِ مباشرةً قبل اسم ألكين الهيدروكربونِ الأمِّ. ضعْ أرقامَ مواقعِ مجموعاتِ الألكيلِ مباشرةً، قبلَ اسمِ مجموعةِ الألكيلِ المقابلةِ.

الشكل 17-10 الإيثاينُ هو الوقودُ المستخدَمُ في لهبِ الأوكسي أسيتيلين الذي تصلُ درجةُ حرارتِه إلى أكثرَ من 3000°C ويستخدمُ في لحامِ المعادنِ.

5. ضعِ الشرطاتِ والفواصلَ.

هذانِ مثالانِ لاسمَينِ صحيحَينِ من أسماءِ الألكايناتِ.

$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}C{\equiv}CH$

1-بنتاين

$CH{\equiv}C{-}\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{CH}}{-}CH_3$

3-ميثيل-1-بيوتاين

خصائصُ الألكايناتِ واستخداماتُها

الألكايناتُ موادُّ عضويَّةٌ غيرُ قطبيَّةٍ لها الميلُ نفسُه في درجاتِ الغليانِ والحالاتِ الفيزيائيَّةِ مثلِ بقيَّةِ الهيدروكربوناتِ. أصغرُ ألكاينٍ معروفٍ هو الإيثاينُ، وهو غازٌ. تُصدرُ شعلةُ مزيجِه مع الأكسجينِ النقيِّ حرارةً عاليةً تُستخدَمُ في عمليّاتِ اللحامِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 17-10. التسميةُ الشائعةُ للإيثاينِ هي الأسيتيلينُ. ويُسمّى اللهبُ الذي يستخدمُ غازَيِ الأسيتيلينِ والأكسجينِ بلهبِ الأوكسي أسيتيلين.

الهيدروكربوناتُ الأروماتيَّةُ (العطريَّةُ)

الهيدروكربوناتُ الأروماتيَّةُ (العطريَّةُ) aromatic hydrocarbons ***هيدروكربوناتٌ تحتوي على حلقةٍ أو أكثرَ مكوَّنةٍ من ستِّ ذرّاتِ كربونٍ والكتروناتٍ غيرِ متموضعةٍ.*** **البنزينُ benzene** ***هو الهيدروكربونُ الأروماتيُّ الأوَّلُ.*** الصيغةُ الجزيئيَّةُ للبنزينِ هي C_6H_6. إحدى الصيغِ البنائيَّةِ للبنزينِ هي حلقةٌ من ستِّ ذرّاتِ كربونٍ وثلاثِ روابطَ ثنائيَّةٍ.

[صيغة بنائية للبنزين: حلقة سداسية بثلاث روابط ثنائية، وعلى كل ذرة كربون H]

ومع ذلك، فإن البنزينَ لا يسلكُ من الناحيةِ الكيميائيَّةِ سلوكَ الألكين. جزيءُ البنزينِ بكاملِهِ يقعُ في المستوى نفسِه، كما هو مبيَّنٌ في الشكل 18-10. كما أن التركيبَ البنائيَّ للبنزينِ يسمحُ للإلكتروناتِ غيرِ المتموضعةِ بالانتشارِ خلالَ أفلاكِ p، على امتدادِ كاملِ الحلقةِ. الصيغتان البنائيَّتان التاليتان تظهران انتشارَ الإلكترونات. في الشكلِ المختصرِ الأيسرِ لا تمثَّلُ ذرّاتُ الهيدروجينِ المرتبطةُ بحلقةِ البنزين.

الشكل 18-10 تداخلُ أفلاكُ الإلكتروناتِ في البنزين لتكوِّنَ أفلاكًا موحَّدةً تسمحُ للإلكتروناتِ غير المتموضعةِ أن تنتشرَ بشكلٍ متجانسٍ على امتدادِ كاملِ الحلقةِ.

يمكنُ اعتبارُ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ كمشتقّاتٍ للبنزين. ولأبسطِها حلقةُ بنزينٍ واحدةٌ، كما هو مبيَّنٌ في المثالِ التالي:

CH_3

ميثيلُ بنزين (التولوين)

تسميةُ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ

أبسطُ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ البنزينُ، وعندما تحلُّ مجموعةُ ألكيلٍ أو أكثرُ محلَّ ذرّاتِ الهيدروجينِ فيه، نحصلُ على مشتقّاتِ البنزين. وتُضافُ أسماءُ مجموعاتِ الألكيلِ في مقدِّمةِ الكلمةِ «بنزين» وفقًا لقواعدِ تسميةِ الهيدروكربوناتِ الأخرى. وكما هي الحالُ في الألكاناتِ الحلقيَّةِ، فإننا لا نحتاجُ إلى ترقيمِ ذرّاتِ الكربونِ في الحلقةِ إذا وُجدَتْ مجموعةُ ألكيلٍ واحدةٌ. وإذا وُجِدَ أكثرُ من مجموعةِ ألكيلٍ واحدةٍ، تُرقَّمُ ذرّاتُ الكربونِ لإعطاءِ جميعِ هذه المجموعاتِ أصغرَ رقمٍ ممكنٍ. وفيما يلي بعضُ الأمثلةِ.

$CH_2–CH_2–CH_3$

بروبيل بنزين

CH_3 CH_3

3،1–ثنائيّ ميثيل بنزين

يمكنُ اختصارُ قواعدِ تسميةِ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ البسيطةِ بما يلي:

تسميةُ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ البسيطةِ

استخدمْ قواعدَ تسميةِ الألكاناتِ على الصفحتيْن 280-281، مع الاستثناءاتِ التاليةِ:

1. **سمِّ الهيدروكربونَ الأمَّ.** الهيدروكربونُ الأمُّ في هذه الحالةِ هو حلقةُ البنزينِ (benzene).
2. **أضفْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيلِ.**

3. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الهيدروكربونِ الأمِّ.** إذا وُجِدَتْ مجموعتا ألكيلٍ مرتبطتان بحلقةِ البنزين، رقِّمْ ذرّاتِ الكربون في الحلقةِ، بوضعِ الرقمِ 1 لموقعِ مجموعةِ الألكيلِ التي تأتي أوّلاً، بحسبِ الترتيبِ الأبجديِّ الإنجليزيِّ. ثم رقِّمْ في الاتِّجاهِ الذي يُعطي مجموعةَ الألكيلِ الثانية أصغرَ رقمٍ ممكن. وإذا وُجِدَتْ عدَّةُ مجموعاتِ ألكيلٍ مرتبطةٍ بحلقةِ البنزين، رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في الحلقةِ، لإعطاءِ جميعِ مجموعاتِ الألكيلِ أصغرَ رقمٍ ممكن.

4. **ضعْ أرقامَ المواقع.**

5. **ضعِ الشرطاتِ والفواصلَ.**

مسألةٌ نموذجية 4-10

ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لـ 1،2-ثنائيّ ميثيل بنزين.

الحلّ

1. حدِّدِ اسمَ الهيدروكربونِ الأمِّ.

1،2-ثنائيّ ميثيل **بنزين**

2. ارسمْ حلقةَ البنزين.

3. رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في حلقةِ البنزين.

4. حدِّدْ مجموعاتِ الألكيل.

1،2-ثنائيّ **ميثيل** بنزين

في هذا الجزيءِ، توجدُ مجموعتا ميثيلٍ فقطْ، تُضافُ البادئةُ ثنائيٌّ إلى كلمةِ ميثيل، للدلالةِ على وجودِ مجموعتَين من هذا الألكيل.

5. حدِّدْ أرقامَ مواقعِ مجموعاتِ الألكيل.

1،2-ثنائيّ ميثيل بنزين

6. اربطْ مجموعتَي الميثيلِ بذرَّتَي الكربونِ المرقَّمتَيْنِ 1 و 2.

CH_3 CH_3

7. تصبحُ الصيغةُ البنائيَّةُ الكاملةُ لـ 1،2-ثنائي ميثيل بنزين كالتالي:

$$C_6H_4(CH_3)_2$$

تمارينُ تطبيقية

1. سمِّ المركَّبَ التاليَ:

$$C_6H_5-CH_2-CH_3$$

2. ارسم الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لـ 1-إيثيل 4-ميثيل بنزين.

الجواب

1. إيثيل بنزين

2. $CH_3-CH_2-C_6H_4-CH_3$

خصائصُ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ واستخداماتُها

تُعدُّ حلقةُ البنزينِ من الناحيةِ الكيميائيَّةِ مستقرَّةً تمامًا. ويمكنُ تفسيرُ هذه الخاصَّةِ من خلالِ مفهومِ الإلكتروناتِ غيرِ المتموضعة. لذلك، تكونُ الهيدروكربوناتُ الأروماتيَّةُ أقلَّ نشاطيَّةً من الألكيناتِ والألكايناتِ. وبسببِ هذه الاستقراريَّةِ، استُخدمَ البنزينُ في الماضي كمذيبٍ غيرِ قطبيٍّ. وكغيرِه من الهيدروكربوناتِ يكونُ البنزينُ غيرَ قطبيٍّ وشحيحَ الذوبانِ في الماءِ. ويبدو أن محاولةَ إزالتِه من الجسمِ بإذابةِ حلقتِه، عن طريقِ الأكسدةِ، ينتجُ جزيئاتٍ سامَّةً. وبسببِ ذلك، استُبدلَ بالبنزينِ كمذيبٍ ميثيلُ البنزينِ (التولوين) الذي يقلُّ عنه سمِّيَّةً.

مراجعةُ القسم 4-10

1. عدِّدِ الميزاتِ البنائيَّةَ التركيبيَّةَ الأساسيَّةَ التي تميِّزُ كلاًّ مما يلي:

أ. الألكينات ب. الألكاينات ج. الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ

2. ارسمْ ثلاثَ صيغٍ بنائيَّةٍ مختصرةٍ يمكنُ أن تمثِّلَ C_4H_8.

3. أعطِ اسمَ الأيوباك لكلِّ مركَّبٍ توردُهُ في إجابتِك على السؤال 2.

4. ارسمِ الصيغَ البنائيَّةَ المختصرةَ لـ: 1،3-بيوتاديين، و 2-بنتاين، و 1،2-ثنائي إيثيل بنزين

تفكيرٌ ناقد

5. **تحليلُ معلومات:** اكتبِ الصيغةَ البنائيَّةَ لألكانٍ وألكينٍ وألكاينٍ يحتوي كلٌّ منها على خمسِ ذرّاتِ كربونٍ. لماذا لا تُعدُّ هذه الهيدروكربوناتُ أيزومرات؟

مراجعةُ الفصل 10

ملخّصُ الفصل

1-10

- الكربونُ مهمٌّ لوجودِه في جميعِ الموادِّ الحيَّةِ.
- تسمحُ الأفلاكُ المهجَّنةُ لذرّاتِ الكربونِ بأن تكوِّنَ روابطَ تساهميَّةً أحاديَّةً، أو ثنائيَّةً، أو ثلاثيَّةً.
- يوجدُ الكربونُ بصورٍ تآصليَّةٍ صلبةٍ متعدِّدةٍ، مثلِ الماسِ، والجرافيتِ، والفوليريناتِ. ولهذه الأشكالِ تراكيبُ بنائيَّةٌ وخصائصُ مختلفةٌ.

المفردات

الماس diamond (260) | الجرافيت graphite (260) | الفوليرين fullerene (260)

2-10

- تحتوي المركَّباتُ العضويَّةُ جميعًا على الكربونِ. لكن ليستْ جميعُ المركَّباتِ المحتويةِ على كربونٍ مركَّباتٍ عضويَّةً.
- عددُ المركَّباتِ العضويَّةِ لا محدودٌ افتراضيًّا، بسببِ خصائصِ ارتباطِ ذرّاتِ الكربونِ. فقدرتُه المتميِّزةُ على الترابطِ التسلسليِّ تسمحُ لذرّاتِه بالترابطِ لتكوينِ سلاسلَ طويلةٍ أو حلقاتٍ. وقدرةُ الكربونِ على الارتباطِ بعناصرَ أخرى، تسمحُ بترتيباتٍ مختلفةٍ للذرّاتِ تزيدُ من تنوُّعِ مركَّباتِ الكربونِ.
- الأيزومراتُ مركَّباتٌ لها الصيغةُ الجزيئيَّةُ نفسُها، لكنّ تركيبَها البنائيَّ يختلفُ. يُستفادُ من الصيغِ البنائيَّةِ في تحديدِ نوعيَّةِ الارتباطِ، وترتيبِ الذرّاتِ في الجزيءِ العضويِّ، وذلك للتمييزِ بين الأيزومراتِ.
- الأيزومراتُ البنائيَّةُ أيزومراتٌ ترتبطُ فيها الذرّاتُ معًا بترتيبٍ مختلفٍ. والأيزومراتُ الهندسيَّةُ هي أيزومراتٌ لها ترتيبُ الترابطِ الذرّيِّ نفسُه، لكنَّ الذرّاتِ تترتَّبُ بشكلٍ مختلفٍ في الفضاءِ.

المفردات

المركَّباتُ العضويَّةُ organic compounds (263) | الأيزومرات isomers (264) | الأيزومراتُ الهندسيَّةُ geometric isomers (266)

الترابطُ التسلسليُّ catenation (264) | الصيغةُ البنائيَّةُ structural formula (264)

الهيدروكربونات hydrocarbons (264) | الأيزومراتُ البنائيَّةُ structural isomers (265)

3-10

- في الهيدروكربوناتِ المشبعةِ، تحتوي كلُّ ذرَّةِ كربونٍ على أربعِ روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ. والألكانُ من الهيدروكربوناتِ المشبعةِ.
- تُسمّى المركَّباتُ العضويَّةُ وفقًا لنظامِ الأيوباك (IUPAC).
- تحتوي الألكاناتُ على روابطَ أحاديَّةٍ فقط. وبما أن الألكاناتِ تحتوي على روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ مشبعةٍ، فإن مركَّباتِها ليستْ نشطةً. ويعدُّ الاحتراقُ من التفاعلاتِ المهمَّةِ للألكاناتِ.
- تتوقَّفُ الخصائصُ الفيزيائيَّةُ للألكانِ، مثلُ درجةِ الغليانِ، على حجمِ الألكانِ وعددِ التفرُّعاتِ فيه.

المفردات

الهيدروكربوناتُ المشبعةُ saturated hydrocarbons (268) | السلسلةُ المتجانسةُ homologous series (268) | البترولُ petroleum (277)

الألكاناتُ alkanes (268) | الألكاناتُ الحلقيَّةُ cycloalkanes (269) | رقمُ الأوكتان octane rating (277)

مجموعاتُ الألكيل alkyl groups (270)

الغازُ الطبيعيُّ natural gas (277)

4-10
- لا ترتبطُ جميعُ ذرّاتِ الكربونِ في الهيدروكربوناتِ غيرِ المشبعةِ بأربعِ روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ. الألكيناتُ والألكايناتُ والهيدروكربوناتُ الأروماتيَّةُ، هي هيدروكربوناتٌ غيرُ مشبعةٍ.
- تحتوي الألكيناتُ على رابطةِ كربونٍ–كربونٍ ثنائيَّةٍ، ويمكنُ أن يكونَ لها أيزومراتٌ هندسيَّةٌ. أصغرُ ألكينٍ هو الإيثين، وهو مادَّةٌ مهمَّةٌ زراعيًّا وصناعيًّا.
- تحتوي الألكايناتُ على روابطَ كربونٍ–كربونٍ ثلاثيَّةٍ.
- البنزينُ ومشتقّاتُه هيدروكربوناتٌ أروماتيَّةٌ. يساعدُ مفهومُ الإلكتروناتِ غيرِ المتموضعةِ، على استقراريَّةِ حلقةِ البنزينِ.

المفردات

الهيدروكربوناتُ غيرُ المشبعةِ (279) unsaturated hydrocarbons
الألكيناتُ (279) alkenes
الألكاينات (283) alkynes
الهيدروكربوناتُ الأروماتيَّةُ (284) aromatic hydrocarbons
البنزين (284) benzene

اختيارٌ من متعدِّدٍ

1. أيٌّ من الخصائصِ التاليةِ للماس غيرُ صحيحةٍ؟
أ. موصِّلٌ جيِّدٌ للكهرباءِ.
ب. موصِّلٌ جيِّدٌ للحرارةِ.
ج. يتمتَّعُ بكثافةٍ عاليةٍ.
د. يتمتَّعُ بدرجةِ انصهارٍ عاليةٍ.

2. أيٌّ من الهيدروكربوناتِ التاليةِ يجبُ أن يكونَ ألكانًا؟
أ. C_2H_2
ب. C_5H_{10}
ج. C_7H_{12}
د. $C_{14}H_{30}$

3. يُسمّى المركَّبُ C_8H_{18}
أ. الأوكتين.
ب. الأوكتاين.
ج. الأوكتان.
د. البروبان.

4. أيٌّ من المركَّباتِ التاليةِ لا يمكنُ أن يكونَ له أيزومراتٌ مختلفةٌ؟
أ. C_7H_{16}
ب. C_5H_{10}
ج. C_3H_8
د. $C_6H_{12}O_6$

5. تفحَّصِ الصيغةَ البنائيَّةَ التاليةَ:

```
            H
     H    H-C-H    H  H
     |      |      |  |
   H-C------C------C--C-H
     |      |      |  |
     H    H-C-H    H  H
            H
```

الاسمُ الصحيحُ لهذا المركَّبِ هو:
أ. 2،2–ثنائيّ ميثيل بيوتان
ب. 1،1،1–ثلاثيّ ميثيل بروبان
ج. 2–إيثيل–2–ميثيل بروبان
د. 3،3–ثنائيّ ميثيل بيوتان

6. فيما يتعلَّقُ بالألكاناتِ الحلقيَّةِ، أيٌّ من العباراتِ التاليةِ ليسَتْ صحيحةً.
أ. الصيغةُ الجزيئيَّةُ العامَّةُ للألكاناتِ الحلقيَّةِ C_nH_{2n}.
ب. الألكاناتُ الحلقيَّةُ هيدروكربوناتٌ غيرُ مشبعةٍ.
ج. أهمُّ تفاعلٍ للألكاناتِ الحلقيَّةِ هو تفاعلُ الاحتراقِ.
د. تتألَّفُ الهيدروكربوناتُ الحلقيَّةُ من كربونٍ وهيدروجينٍ فقط.

مراجعةُ المفاهيم

7. ما اتِّجاهُ الروابطِ التساهميَّةِ الأربعِ والأفلاكِ sp^3 لذرَّةِ الكربونِ؟

8. سمِّ ثلاثةَ صورٍ تآصليَّةٍ للكربونِ وصفْ تراكيبَها البنائيَّةَ.

9. ما خصائصُ الماسِ المحدِّدةُ لأهمِّ استخداماتِه الصناعيّةِ؟

10. كيف يساهمُ الترابطُ التسلسليُّ في تنوُّعِ المركَّباتِ العضويَّةِ؟

11. أ. إذا أُعطيتَ صيغةً بنائيَّةً لمركَّبٍ، فما المعلوماتُ التي تحصلُ عليها من ذلك؟
ب. كيف تُستخدَمُ الصيغةُ البنائيَّةُ في الكيمياءِ العضويَّةِ؟

مراجعةُ الفصل 10

12. ما المقصودُ بكلٍّ من: الترابطِ التسلسليِّ، الهيدروكربوناتِ، الأيزومراتِ البنائيَّةِ، الأيزومراتِ الهندسيَّةِ، السلسلةِ المتجانسةِ، الألكاناتِ الحلقيَّةِ؟

13. هل يمكنُ للجزيئَين ذوَي الصيغتَينِ الجزيئيَّتَين C_4H_{10} و $C_4H_{10}O$ أن يكونا أيزومرَيْن بنائيَّيْن أحدُهما للآخرِ؟ علِّلْ إجابتك.

14. علّلْ ما يلي:

أ. الجرافيتُ يوصِّلُ الكهرباء، أما الماسُ فلا يوصِّلُ.

ب. يُستخدمُ الجرافيتُ في عمليّاتِ التشحيم.

ج. وجودُ الألكاناتِ الأربعةِ الأولى في الطبيعةِ على الحالةِ الغازيَّةِ.

د. استبدالُ التولوين بالبنزينِ كمذيبٍ.

هـ. المركَّباتُ العضويَّةُ ذاتُ الروابطِ التساهميَّةِ أقلُّ استقرارًا لدى تسخينِها من المركَّباتِ غيرِ العضويَّةِ ذات الروابطِ الأيونيَّةِ.

و. يوجدُ للألكيناتِ والألكاناتِ الحلقيَّةِ أيزومراتٌ هندسيَّةٌ بينما لا يوجدُ للألكاناتِ.

15. أ. ما الفرقُ بينَ هيدروكربونٍ مشبعٍ وهيدروكربونٍ غيرِ مشبعٍ؟

ب. صنِّفِ الألكيناتِ، والألكاناتِ، والألكايناتِ، والهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةَ، كمركَّباتٍ مشبعةٍ أو غيرِ مشبعةٍ.

16. صنِّف ما يلي كألكانٍ، أو ألكينٍ، أو ألكاينٍ، أو هيدروكربونٍ أروماتيٍّ.

أ. (حلقة بنزين مرتبط بها مجموعتا) $CH_2{-}CH_3$ و $CH_2{-}CH_3$

ب. $CH_3{-}CH{=}CH_2$

ج.
```
        CH3
        |
CH≡C–CH–CH2–CH3
```

د.
```
CH3–CH–CH2–CH2–CH2–CH2–CH3
    |
    CH3
```

17. ما الصيغةُ العامَّةُ لكلٍّ من:

أ. الألكان

ب. الألكين

ج. الألكاين

18. اكتبِ الصيغةَ الجزيئيَّةَ لكلِّ نوعِ هيدروكربونٍ، إذا احتوى على سبعِ ذرّاتِ كربونٍ.

أ. الألكان

ب. الألكين

ج. الألكاين

19. أ. ما الميلُ الذي يظهرُ في درجةِ غليانِ الألكاناتِ؟

ب. كيفَ تفسِّرُ هذا الميلَ؟

20. كيفَ يؤثِّرُ التركيبُ البنائيُّ للألكاناتِ في رقمِ الأوكتان للجازولين؟

21. اكتبْ معادلةً موزونةً للاحتراقِ التامِّ لكلٍّ مما يلي:

أ. الميثان

ب. الإيثاين

22. أيُّ أنواعِ الأيزومراتِ محتملةٌ في الألكاناتِ (غيرِ الحلقيَّةِ)، والألكيناتِ، والألكايناتِ؟ ولماذا؟

23. اكتبْ استخدامًا واحدًا لكلٍّ من:

أ. الإيثين

ب. الإيثاين

24. أ. ما المقصودُ بالإلكتروناتِ غيرِ المتموضعةِ؟

ب. ما تأثيرُها في نشاطيَّةِ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةِ؟

25. ما اسمُ الهيدروكربونِ الأمِّ لهيدروكربونٍ أروماتيٍّ بسيطٍ؟

أسئلةٌ عامَّة

26. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لما يلي:

```
    H    H    H
    |    |    |
H–C=C–––C–––C–H
  |      |    |
  H    H–C–H  H
         |
         H
```

27. حدّدْ لكلِّ زوجٍ من الصيغِ التاليةِ إن كانَ يمثِّلُ الجزيئاتِ نفسَها أم جزيئاتٍ مختلفةً.

أ. C_5H_{12} و

```
  H  H    H    H
  |  |    |    |
H–C–C–––C–––C–H
  |  |    |    |
  H  H  H–C–H  H
          |
          H
```

ب. $CH_3–CH_2–CH_3$ و

```
H  H  H  H
|  |  |  |
H–C––C––C––C–H
|  |  |  |
H  H  H  H
```

ج. C_6H_{10} و

```
CH3–CH=C–CH3
        |
        CH3
```

د.

```
H        H          H          H  H
|        |          |          |  |
H–C––––––C––––––––––C––––––––––C––C–H
|        |          |          |  |
H     H–C–H      H–C–H         H  H
         |          |
         H          H
```

و

```
CH3–CH–CH–CH2–CH3
     |   |
    CH3 CH3
```

28. حدِّدْ لكلِّ زوجٍ من الصيغِ التاليةِ إن كان يمثِّلُ الجزيءَ نفسَه أم أيزومراتٍ بنائيَّةً.

أ. $CH_3–CH_2–CH_2–CH_3$ و

```
CH3
|
CH2–CH2–CH3
```

ب.

```
                 CH3
                 |
CH3–CH–CH2–CH2
     |
     CH2
     |
     CH3
```

و

```
              CH3
              |
CH3–CH–CH2–CH–CH3
     |
     CH3
```

ج.

```
            O
            ||
CH3–CH2–C–OH
```

و

```
               O
               ||
CH3–O–CH2–CH
```

29. ارسمِ الصيغَ البنائيَّةَ للأيزومراتِ الخمسةِ لـ C_6H_{14}.

30. ارسمِ الأيزومراتِ الهندسيَّةَ للجزيءِ التالي، وحدِّدْ كلَّ أيزومرٍ إن كانَ (م) أو (ض).

$CH_3–CH=CH–CH_2–CH_3$

31. أ. أيٌّ ممّا يلي له أيزومراتٌ هندسيَّةٌ؟

$CH_3–CH=CH–Cl$

```
           CH3
           |
CH3–CH=C–CH3
```

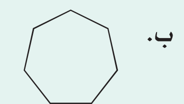
$CH_3–CH_2–CH=CH–CH_2–CH_3$

ب. ارسمِ الأيزومراتِ الهندسيَّةَ لتلكَ التي يمكنُ أن يكونَ لها أيزومراتٌ هندسيَّةٌ.

ج. حدِّدْ كلَّ أيزومرٍ إن كانَ (م) أو (ض).

32. سمِّ الجزيئاتِ التاليةَ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 10-1)

أ. $CH_3–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_2–CH_3$

ب. 

ج.

```
       CH3
       |
CH3–C–CH2–CH–CH2–CH3
       |        |
       CH3      CH3
```

د.

```
       CH3         CH2–CH2–CH2–CH3
       |           |
CH3–C–CH2–CH2–CH–CH2–CH2–CH2–CH3
       |
       CH3
```

33. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ وغيرَ المختصرةِ لكلٍّ من الألكاناتِ التاليةِ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 10-2)

أ. ديكان

ب. 3،3–ثنائيّ ميثيل بنتان

34. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الألكاناتِ التاليةِ:

أ. 1،1–ثنائيّ ميثيل بروبان حلقي

ب. 2،2،4،4–رباعيّ ميثيل بنتان

35. حدِّدْ إن كانَتْ تسميةُ الألكانِ صحيحةً في كلٍّ مما يلي. وإذا لم تكن كذلك، فاذكرِ التسميةَ الصحيحةَ.

أ.

```
CH3–CH2–CH2
             |
             CH3
```

1–ميثيل بروبان

ب.

```
CH3–CH2–CH2–CH2–CH2–CH2–CH2
                         |
                         CH2
                         |
                         CH3
```

نونان

ج.

```
                  CH3
                  |
CH3–CH2–CH2–CH–CH2–CH3
```

4–ميثيل هكسان

د.

```
                        CH3
                        |
CH3–CH2–CH–CH2–CH–CH3
             |
             CH2–CH3
```

4–إيثيل–2–ميثيل هكسان

36. سمِّ الألكيناتِ التاليةَ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 10-3)

أ. $CH_2=CH–CH_2–CH_2–CH_3$

ب. $CH_3(CH_3)C{=}C(H)CH_3$

ج. $CH_2{=}CH{-}C(CH_3)(CH_2CH_3){-}CH_2{-}CH_3$

د. $CH_2{=}C(CH_3){-}CH_2{-}CH_2{-}CH{=}CH_2$

37. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الألكيناتِ التاليةِ:

أ. 2-ميثيل-2-هكسين

ب. 3-إيثيل-2،2-ثنائيّ ميثيل-3-هبتين

38. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ للأيزومراتِ الهندسيَّةِ لكلٍّ ممّا يلي:

أ. $CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}CH{=}CH{-}CH_3$

ب. 3-ميثيل-2-بنتين

39. سمِّ الألكايناتِ التاليةَ:

أ. $CH{\equiv}C{-}CH_3$

ب. $CH_3{-}C{\equiv}C{-}CH(CH_3){-}CH_3$

ج. $CH_3{-}CH(CH_3){-}C{\equiv}C{-}CH(CH_3){-}CH_3$

40. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الألكايناتِ التاليةِ:

أ. 1-ديكاين

ب. 6،6-ثنائيّ ميثيل-3-هبتاين

41. سمِّ الهيدروكربوناتِ الأروماتيَّةَ التاليةَ: (انظرِ المسألةَ النموذجيَّةَ 10-4)

أ. C_6H_6 (حلقة بنزين)

ب. حلقة بنزين تحمل أربع مجموعات CH_3

42. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ المختصرةَ للجزيئَيْنِ التاليَيْنِ:

أ. 1، 3، 5-ثلاثيّ ميثيل بنزين

ب. 1، 3-ثنائيّ ميثيل بنزين

مراجعةٌ متنوعة

43. أ. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ غيرَ المختصرةِ لـ 4-ميثيل أوكتان.

ب. حوِّلِ الصيغةَ إلى صيغةٍ بنائيَّةٍ مختصرةٍ.

ج. حدِّدِ الصيغةَ الجزيئيةَ للجزيءِ من الصيغةِ التي رسمْتَها، وكذلك من الصيغةِ الجزيئيَّةِ العامَّةِ للألكاناتِ. ثم قارنْ بين الاثنَيْنِ. هل هما متشابهتان؟

44. ارسمْ صيغتينِ بنائيَّتَيْنِ مختصرتَيْنِ مختلفتينِ لكلِّ جزيءٍ من أنواعِ الهيدروكربوناتِ التاليةِ والمحتويةِ على ثمانِ ذرّاتِ كربونٍ ثم سمِّها.

أ. الألكان   ج. الألكاين

ب. الألكين   د. الهيدروكربونُ الأروماتيُّ

45. ارسمِ الصيغتَيْنِ البنائيَّتَيْنِ المختصرتَيْنِ لـ 4،4-ثنائيّ ميثيل-2-بنتاين و 2،2-ثنائيّ ميثيل-4-بروبيل أوكتان.

46. ارسمْ ثلاثةَ أيزومراتٍ بنائيَّةٍ لألكاينٍ يحتوي على خمسِ ذرّاتِ كربونٍ ورابطةٍ ثلاثيَّةٍ. سمِّ الجزيئاتِ التي رسمتَها.

47. أيُّ الجزيئاتِ التاليةِ لها أيزومراتٌ هندسيَّةٌ؟ ارسمْ الأيزومراتِ الهندسيَّةَ المحتملةَ كافَّةً، ثم علِّمِ الجزيئاتِ التي رسمْتَها على أنها إما (م) وإما (ض).

أ. بيوتان   ج. 2-هكساين

ب. 2-بنتين   د. 2-ميثيل-1-بيوتين

48. حدِّدْ إن كانَ كلُّ زوجٍ من الأزواجِ التاليةِ يمثِّلُ المركَّبَ نفسَه، أم يمثِّلُ أيزومرَيْنِ أم مركَّبَيْنِ مختلفَيْنِ.

أ. $CH_3{-}CH(CH_3){-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$ (صيغة بنائية كاملة) و $CH_3{-}CH(CH_3){-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$

ب. C_4H_8 و $H_3C{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$ (صيغة بنائية كاملة)

ج.

$$\begin{array}{l} CH_3 \\ | \\ CH_3CH_2 \\ || \\ CH_3-C\text{——}CH_2 \\ | \\ CH_3 \end{array}$$

و

$$\begin{array}{l} CH_3 \\ | \\ CH_3-C-CH_2-CH_2-CH_3 \\ | \\ CH_3 \end{array}$$

د.

$$\begin{array}{l} CH_3-C=CH-CH_2-CH_3 \\ | \\ CH_3 \end{array}$$

و

$$\begin{array}{l} CH_3-CH_2-CH-CH=CH_2 \\ | \\ CH_3 \end{array}$$

تفكيرٌ ناقد

49. استدلالٌ على علاقة: العنصرُ الذي يظهرُ في العددِ الأكبرِ من المركَّباتِ هو الهيدروجينُ، والعنصرُ الذي يأتي في المرتبةِ الثانيةِ هو الكربونُ. لماذا هنالك مركَّباتٌ تحتوي على هيدروجينٍ أكثرَ من المركَّباتِ المحتويةِ على كربونٍ؟

50. ربطُ أفكار: بزيادةِ عددِ ذرّاتِ الكربونِ في جزيءِ الألكان، هل تزدادُ النسبةُ المئويةُ للهيدروجين، أم تقلُّ أم تبقى كما هي؟

بحثٌ وكتابة

51. اخترْ أحدَ المنتجاتِ المصنَّعةِ من البترول، ثمَّ اكتبْ تقريرًا عن آليَّةِ تصنيعِه وطرقِ استخدامِه والسلامةِ البيئيَّةِ له.

تقويمٌ بديل

52. أداء: صمِّمْ نماذجَ للصورِ التآصليَّةِ لكلٍّ من الماسِ والجرافيتِ والفوليرين.

الفصل 11

مركَّباتٌ عضويَّةٌ أخرى

تُستخدمُ المركَّباتُ العضويَّةُ في تصنيعِ عددٍ كبيرٍ من المنتجاتِ التي نستخدمُها في حياتِنا اليوميَّةِ

القســـم 1-11

المجموعاتُ الوظيفيَّةُ وأصنافُ المركَّباتِ العضويَّةِ

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يعرِّفُ المجموعةَ الوظيفيَّةَ موضحًا أهميَّتَها.
- يتعرَّفُ الكحولاتِ، وهاليداتِ الألكيلِ، والإيثراتِ اعتمادًا على المجموعاتِ الوظيفيَّةِ الموجودةِ في كلٍّ منها.
- يصنِّفُ الكحولاتِ، وهاليداتِ الألكيلِ، والإيثراتِ اعتمادًا على الصيغِ البنائيَّةِ.
- يربطُ بينَ التراكيبِ البنائيَّةِ لكلٍّ من الكحولاتِ وهاليداتِ الألكيلِ والإيثراتِ وبينَ كلٍّ من خصائصِها واستخداماتِها.

المجموعةُ الوظيفيَّةُ functional group ***ذرَّةٌ أو مجموعةُ ذرّاتٍ مسؤولةٌ عن الخصائصِ النوعيَّةِ للمركَّبِ العضويِّ***، وغالبًا ما تكونُ الروابطُ في المجموعةِ الوظيفيَّةِ مواقعَ للنشاطِ الكيميائيِّ. تخضعُ المجموعةُ الوظيفيَّةُ المعيَّنةُ لأنواعِ التفاعلاتِ نفسِها في كلِّ جزيءٍ تكونُ فيه. لذلك تتميَّزُ كلُّ المركَّباتِ المحتويةِ على المجموعةِ الوظيفيَّةِ نفسِها بخصائصَ متشابهةٍ وتصنَّفُ في الفئةِ نفسِها.

الكـحـولات

الكحولاتُ alcohols ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ تحتوي على مجموعةِ هيدروكسيلٍ واحدةٍ أو أكثرَ.*** ويعبَّرُ عن الصيغةِ العامَّةِ للكحولاتِ بـ R-OH، حيثُ R شقٌّ يمثِّلُ باقيَ الجزيءِ. تحدِّدُ الأسماءُ المنهجيَّةُ للمركَّباتِ العضويَّةِ أيَّ مجموعةٍ أو مجموعاتٍ وظيفيَّةٍ موجودةٍ في الجزيءِ. وفيما يلي قواعدُ تسميةِ الكحولاتِ البسيطةِ بحسبِ نظامِ IUPAC.

تسميةُ الكحولاتِ

1. **سمِّ المركَّبَ الأمَّ.** حدِّدِ السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ لذرّاتِ الكربونِ المحتويةِ على مجموعةِ الهيدروكسيلِ. إذا وُجِدَتْ مجموعةٌ واحدةٌ من الهيدروكسيلِ، أضفِ المقطعَ -ول (-ol) إلى نهايةِ اسمِ الألكانِ المقابلِ. وإذا وُجِدَ أكثرُ من مجموعتَيْ هيدروكسيلٍ، استخدمِ اسمَ الألكانِ المقابلِ، وأضفْ مقطعًا يعبِّرُ عن عددِ هذه المجموعاتِ. مثلاً، -ديول (-diol) = 2، -تريول (-triol) = 3، ... وهكذا.
2. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ الأمِّ.** رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ بحيثُ تعطي مجموعةَ الهيدروكسيلِ الرقمَ الأصغرَ الممكنَ.
3. **أدخلْ أرقامَ المواقعِ.** ضعْ رقمَ (أرقامَ) موقعِ (مواقعِ) الهيدروكسيلِ قبلَ اسمِ الكحولِ الأمِّ مباشرةً.
4. **ضعِ الشرطاتِ والفواصلَ.** افصلْ أرقامَ المواقعِ عن الاسمِ بشرطةٍ، وافصلْ بينَ أرقامِ المواقعِ إنْ وُجِدَ أكثرُ من رقمٍ، بفواصلَ.

وفيما يلي ثلاثةُ أمثلةٍ على التسميةِ الصحيحةِ للكحولاتِ.

$$CH_3-CH_2-\underset{}{\overset{OH}{\overset{|}{C}}}H_2$$

1-بروبانول

$$CH_3-CH_2-\overset{OH}{\overset{|}{C}}H-CH_3$$

2-بيوتانول

$$CH_3-\underset{\underset{OH}{|}}{\overset{OH}{\overset{|}{C}}}-CH_2-CH_3$$

2،2-بيوتانديول

الجدول 11-1 درجةُ غليانِ بعضِ الكحولاتِ والألكاناتِ

المركَّب	الصيغةُ الجزيئيَّةُ	الكتلةُ الموليَّةُ (g/mol)	درجةُ الغليانِ (°C)
ميثانول	CH_3OH	32	64.7
إيثان	C_2H_6	30	–88
إيثانول	C_2H_5OH	46	78.3
بروبان	C_3H_8	44	–42.1
1-بروبانول	C_3H_7OH	60	97.2
بيوتان	C_4H_{10}	58	–0.50

خصائصُ الكحولاتِ واستخداماتُها

يبيِّنُ الجدولُ 11-1 أن درجاتِ غليانِ الكحولاتِ تميلُ إلى الارتفاع، قياسًا على درجاتِ غليانِ الألكاناتِ ذاتِ الكتلِ الموليَّةِ المقاربةِ. مثلاً، تبلغُ الكتلةُ الموليَّةُ للإيثانولِ 46 g/mol، وهي بذلك قريبةٌ من الكتلةِ الموليَّةِ للبروبانِ (44 g/mol). من ناحيةٍ أخرى، تكونُ درجتا غليان هاتَينِ المادَّتَينِ مختلفتَينِ إحداهُما عن الأخرى تمامًا. ذلك أن درجةَ غليانِ الإيثانولِ 78.3°C، في حينِ أن درجةَ غليانِ البروبانِ –42.1°C. بالإضافةِ إلى ذلك، فإن درجاتِ الغليانِ ترتفعُ كلَّما زادَتْ أعدادُ مجموعاتِ الهيدروكسيلِ في جزيءِ الكحول. ويمكنُ ملاحظةُ هذه السمةِ في الجدول 11-2، الذي يبيِّنُ درجاتِ غليانِ كحولاتٍ ذاتِ مجموعةِ هيدروكسيلٍ واحدةٍ، ومجموعتينِ، وثلاثِ مجموعاتٍ. يمكنُ تفسيرُ هذا الميلِ في درجاتِ الغليانِ، الموضَّحِ في الجدولَيْنِ 11-1 و 11-2، من خلالِ الرابطةِ الهيدروجينيَّةِ.

فبالمقارنةِ مع الألكانِ يجبُ توافرُ طاقةٍ إضافيَّةٍ، لكسرِ الروابطِ الهيدروجينيَّةِ بينَ جزيئاتِ الكحولِ، قبلَ تحوُّلِه من الحالةِ السائلةِ إلى الحالةِ الغازيَّةِ. وعندما يحتوي جزيءُ الكحولِ على أكثرَ من مجموعةِ هيدروكسيلٍ واحدةٍ، قد يشكِّلُ هذا الجزيءُ روابطَ

الجدول 11-2 مجموعاتُ هيدروكسيلٍ متعدِّدةٌ، ودرجاتُ غليانِ الكحولاتِ

الكحول	عددُ مجموعاتِ الهيدروكسيلِ	درجةُ الغليانِ (°C)
إيثانول	1	78.3
1،2-إيثانديول	2	197.3
1-بروبانول	1	97.2
1،2-بروبانديول	2	188
1،2،3-بروبانتريول	3	260-258

الجدول 11-3 ذوبانيَّةُ بعضِ الكحولاتِ في الماءِ

الكحول	الصيغة الجزيئيَّةُ	الذوبانيَّةُ $(g/100\ g\ H_2O)$
ميثانول	CH_3OH	∞ (تامُّ الذوبانِ)
1-بيوتانول	C_4H_9OH	7.4
1-بنتانول	$C_5H_{11}OH$	2.7
1-أوكتانول	$C_8H_{17}OH$	0.06

هيدروجينيَّةً متعدِّدةً. وفي هذه الحالةِ ستحتاجُ إلى طاقةٍ أكثرَ، لكسرِ هذه الروابطِ، قبلَ تحوُّلِ الكحولِ السائلِ إلى غازٍ.

بيَّنا في الفصلِ الأوَّلِ أنَّ الكحولاتِ قابلةٌ للذوبانِ في الماءِ بسببِ الرابطةِ الهيدروجينيَّةِ. إلا أن ذوبانَ الكحولِ في الماءِ يقلُّ بزيادةِ حجمِ الجزيءِ. فكلما ازدادَ طولُ سلسلةِ الهيدروكربونِ في الكحولِ، يزدادُ حجمُ الجزءِ غيرِ القطبيِّ، وغيرِ القابلِ للذوبانِ من الجزيءِ. ويوضِّحُ الجدولُ 11-3 هذا الميلُ في الذوبانيَّةِ.

وتفسِّرُ الرابطةُ الهيدروجينيَّةُ في الكحولاتِ أيضًا خصائصَ أخرى للكحولاتِ واستخداماتِها. أحمرُ الشفاهِ، ومراهمُ اليديْنِ والجسمِ، تحتوي عادةً على مادَّةٍ تسمّى الجليسيرولَ (1،2،3-بروبانتريول) لإبقاءِ هذه الموادِّ رطبةً. ذلك أن احتواءَ الجليسيرولِ على مجموعاتِ هيدروكسيلٍ متعدِّدةٍ يسمحُ بتكوينِ روابطَ هيدروجينيَّةٍ متعدِّدةٍ مع جزيئاتِ الماءِ في الهواءِ، أو في الموادِّ المحيطةِ. يُظهرُ الشكلُ 11-1 نموذجًا للجليسيرولِ.

يُستخدمُ الكحولُ أحيانًا كوقودٍ بديلٍ، وكمحسِّنٍ للأوكتانِ في وقودِ المحرِّكاتِ. ويُمزجُ الإيثانولُ مع الجازولينِ، مثلاً، بنسبةِ 9:1، لإنتاجِ الجازوهولِ الذي يروِّجُه بعضُ الخبراءِ، كوقودٍ بديلٍ للمركَّباتِ لأنه يحترقُ بنظافةٍ أكثرَ من الجازولينِ التقليديِّ، ويساهمُ في المحافظةِ على مخزونِ البترولِ، ويقلِّلُ من الاعتمادِ على استهلاكِ النفطِ. ومع ذلك، فإن ثمَّةَ مساوئَ لهذا الوقودِ. ذلك أن احتراقَ جرامٍ واحدٍ من الإيثانولِ ينتجُ طاقةً تساوي 60% من الطاقةِ التي ينتجُها جرامٌ من الجازولينِ وحدَهُ. كما أن وجودَ الإيثانولِ يزيدُ من امتصاصِ الوقودِ للماءِ.

الشكل 11-1 يحتوي الجليسيرولُ على ثلاثِ مجموعاتِ هيدروكسيلٍ. يعملُ هذا التركيبُ على تكوينِ ثلاثِ روابطَ هيدروجينيَّةٍ مع الماءِ. يُضافُ الجليسيرولُ كمرطِّبٍ إلى المنتجاتِ التي تُعنى بالجلدِ والبشرةِ.

تعدُّ كلُّ أنواعِ الكحولِ البسيطةِ سامَّةٌ إلى حدٍّ ما. ولدى تعاطي الإيثانولِ يتحلَّلُ بفعلِ الأنزيمِ ديهيدروجينيز الكحولِ alcohol dehydrogenase متحوِّلاً بسرعةٍ إلى حالةٍ مؤكسَدةٍ تُعرفُ بالأسيتالدهيد acetaldehyde التي تتحوَّلُ بدورها إلى حمضِ الأسيتيكِ. ويعدُّ تعاطي الكحولِ قاتلاً للنفسِ البشريَّةِ. والجرعةُ المميتةُ من الإيثانولِ تختلفُ من شخصٍ إلى آخرَ. ولذا حرصَ الإسلامُ على تحريمِه بقولِه تعالى: «إِنَّمَا الْخَمْرُ وَالْمَيْسِرُ وَالْأَنْصَابُ وَالْأَزْلَامُ رِجْسٌ مِنْ عَمَلِ الشَّيْطَانِ فَاجْتَنِبُوهُ»، سورةُ المائدةِ، الآيةُ 90. وذلك لخطورةِ تعاطي الكحولاتِ لما لها من عواقبَ اجتماعيَّةٍ وصحيَّةٍ.

من ناحيةٍ أخرى، تتأكسدُ أنواعُ الكحولِ البسيطةِ الأخرى بالأنزيمِ ديهيدروجينيز الكحولِ ببطءٍ أكثرَ ويحوِّلُها إلى موادَّ أكثرَ سمّيَّةٍ من الإيثانولِ. فالميثانولُ، أو كحولُ الخشبِ، يتحوَّلُ إلى فورمالدهيدٍ وحمضِ الفورميكِ شديدَي السمِّيَّةِ، اللذَيْنِ يسبِّبانِ أضرارًا بالغةً للخلايا قبلَ أن يتمكَّنَ الجسمُ من التخلُّصِ منهما تمامًا. إن الميثانولَ أكثرُ سُمِّيَّةً من الإيثانولِ بعشرةِ أمثالٍ تقريبًا. ويتضمَّنُ التأثيرُ السمِّيُّ للميثانولِ أضرارًا للعصبِ البصريِّ، والغيبوبةَ، ثم الوفاةَ.

هاليداتُ الألكيلِ

هاليداتُ الألكيلِ alkyl halides ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ تحلُّ فيها ذرَّةُ هالوجينٍ (فلور، كلور، بروم) واحدةٌ أو أكثرُ محلَّ ذرَّةِ هيدروجينٍ أو أكثرَ في جزيءِ الهيدروكربونِ.*** وحيثُ أن X يُستخدَمُ غالبًا لتمثيلِ الهالوجينِ، فإن أيَّ هاليدِ ألكيلٍ يمكنُ تمثيلُه بالصيغةِ العامَّةِ $R\text{-}X$. وفيما يلي قواعدُ تسميةِ هاليداتِ الألكيلِ البسيطةِ بحسبِ نظامِ IUPAC.

تسميةُ هاليداتِ الألكيلِ

1. **سمِّ المركَّبَ الأمَّ.** حدِّدِ السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ لذرّاتِ الكربونِ المحتويةِ على الهالوجينِ. أضفْ بادئاتِ ذرّاتِ الهالوجينِ المتَّصلةِ إلى اسمِ الألكانِ المقابلِ لعددِ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ. البادئاتُ المستخدمةُ هي فلورو (fluoro) للفلورِ، والكلورو (chloro) للكلورِ، والبرومو (bromo) للبرومِ، ويودو (iodo) لليودِ. وإذا وُجدَ أكثرُ من نوعٍ واحدٍ من ذرّاتِ الهالوجينِ، أضفْ بادئاتِ الهالوجينِ بحسبِ التسلسلِ الأبجديِّ للحروفِ الإنجليزيَّةِ. وإذا وُجدَ أكثرُ من ذرَّةٍ واحدةٍ للهالوجينِ نفسِه، أضفِ البادئةَ الأنسبَ (ثنائيَّ، أو ثلاثيَّ وغيرَها)، بعدَ ترتيبِ بادئاتِ الهالوجينِ بحسبِ الحروفِ الأبجديَّةِ.
2. **رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ الأمِّ.** رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ بحيثُ يصبحُ مجموعُ أعدادِ الهالوجينِ أقلَّ ما يمكنُ. وإذا وُجدَتْ ذرّاتُ هالوجينٍ مختلفةٌ في مواقعَ متساويةٍ، أعطِ الرقمَ الأصغرَ لذرّةِ الهالوجينِ التي تأتي أوَّلاً في الترتيبِ الأبجديِّ.
3. **أدخلْ أرقامَ المواقعِ.** ضعْ رقمَ موقعِ الهالوجينِ أو الأرقامَ قبلَ بادئاتِ الهالوجينِ مباشرةً.
4. **ضعِ الشرطاتِ والفواصلَ.** افصلْ أرقامَ المواقعِ عن الاسمِ بشرطةٍ، وافصلْ بين أرقامِ المواقعِ بفواصلَ، إن وُجِدَ أكثرُ من رقمٍ.

مسألةٌ نموذجية 1-11

سمِّ هاليدَ الألكيلِ المبيَّن.

$$\begin{array}{c} \quad H\ \ H\ \ H \\ H-C-C-C-H \\ \quad Br\ Br\ H \end{array}$$

الحلّ

1. حدِّدْ موقعَ السلسلةِ المستمرَّةِ الأطولِ لذرّاتِ الكربونِ المحتويةِ على الهالوجينِ.

$$\begin{array}{c} \quad H\ \ H\ \ H \\ H-C-C-C-H \\ \quad Br\ Br\ H \end{array}$$

للسلسلةِ ثلاثُ ذرّاتِ كربونٍ، فيكونُ اسمُ السلسلةِ البروبانَ.

2. عيِّنِ اسمَ ذرّاتِ الهالوجينِ المتَّصلةِ بالسلسلةِ وسمِّها.

$$\begin{array}{c} \quad H\ \ H\ \ H \\ H-C-C-C-H \\ \quad Br\ Br\ H \end{array}$$

يتصلُ بالسلسلةِ ذرّتا بروم. أضفِ البادئةَ برومو لتكونَ أمامَ اسمِ البروبان. ثم أضفِ البادئةَ ثنائيَّ لتبيِّنَ وجودَ ذرَّتَين من البروم.

ثنائيُّ برومو بروبان

3. رقِّمْ سلسلةَ ذرّاتِ الكربونِ، بحيثُ يكونُ مجموعُ أعدادِ الهالوجينِ أقلَّ ما يمكنُ.

$$\begin{array}{c} \quad H\ \ H\ \ H \\ \quad |^1\ \ |^2\ \ |^3 \\ H-C-C-C-H \\ \quad Br\ Br\ H \end{array}$$

4. ستقعُ ذرّتا البرومِ على الكربونِ 1 و 2. ضعْ هذَيْنِ الرقمَين قبلَ بادئةِ الهالوجينِ مباشرةً، ثم افصلْ ما بينَ الأرقامِ والبادئةِ بشرطةٍ، وما بينَ الأرقامِ بفاصلةٍ.

2،1-ثنائيّ برومو بروبان

فيصبحُ الاسمُ الكاملُ 2،1-ثنائيّ برومو بروبان.

تمارينُ تطبيقية

1. سمِّ كلاًّ ممّا يلي من هاليداتِ الألكيلِ:

أ.
$$\begin{array}{c} \quad\quad Br \\ CH_3-CH-CH_3 \end{array}$$

ب.
$$\begin{array}{c} \quad\ F\quad\ F\quad\ F \\ CH_3-CH-CH-CH_2 \end{array}$$

2. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لهاليداتِ الألكيلِ التاليةِ:

أ. 2-يودو بروبان

ب. 1،1،1،2-رباعيّ برومو بيوتان

الجواب

1. أ. 2-برومو بروبان

ب. 1،2،3-ثلاثيّ فلورو بيوتان

2. أ.
$$\begin{array}{c} \quad\quad I \\ CH_3-CH-CH_3 \end{array}$$

ب.
$$\begin{array}{c} \quad Br\ Br \\ Br-C-CH-CH_2-CH_3 \\ \quad Br \end{array}$$

خصائصُ هاليداتِ الألكيلِ واستخداماتُها

تُعدُّ هاليداتُ الألكيلِ واحدةً من أكثرِ الكيميائيّاتِ العضويَّةِ استخدامًا. ومن هاليداتِ الألكيلِ التي اكتسبَتِ اهتمامًا كبيرًا في الوقتِ الحاضرِ، مركَّباتُ الكلورو فلورو كربون chlorofluorocarbons أو CFCs. هذه المركَّباتُ تحتوي على كلٍّ من الكلورِ والفلورِ معًا، ونوردُ فيما يلي صيغتين لمثالَيْن شائعَين هما الفريون-11، والفريون-12.

F–C(Cl)(Cl)–Cl	Cl–C(F)(Cl)–F
ثلاثيّ كلورو فلورو ميثان	ثنائيّ كلورو ثنائيّ فلورو ميثان
(فريون-11)	(فريون-12)

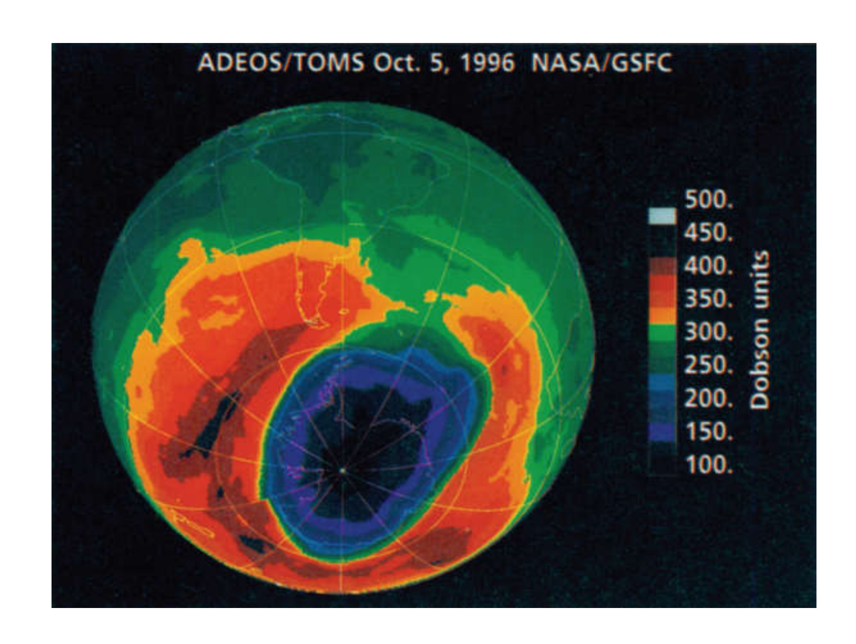
إن كلاًّ من CFC-11 و CFC-12 مادَّةٌ عديمةُ الرائحةِ، غيرُ قابلةٍ للاشتعالِ وغيرُ سامَّةٍ ومستقرّةٌ جدًّا، ويمكنُ بسهولةٍ تحويلُها من حالةٍ فيزيائيَّةٍ إلى حالةٍ أخرى. وقد جعلَتْ هذه الخصائصُ المادَّتَين المذكورتَين مفيدتَين في عددٍ من الصناعاتِ. وقد استُخدِمَتا لتصنيعِ البلاستيكِ الرغويِّ وكسائلٍ للتبريدِ في الثلاّجاتِ.

تساهمُ مركَّباتُ CFCs بتدميرِ طبقةِ الأوزونِ في الجوِّ، كما يلاحظُ في الشكل 11-2. فعندَما تُطلقُ مركَّباتُ CFCs إلى الجوِّ، تتحلَّلُ بفعلِ أشعةِ الشمسِ، محرِّرةً ذرّاتِ الكلورِ.

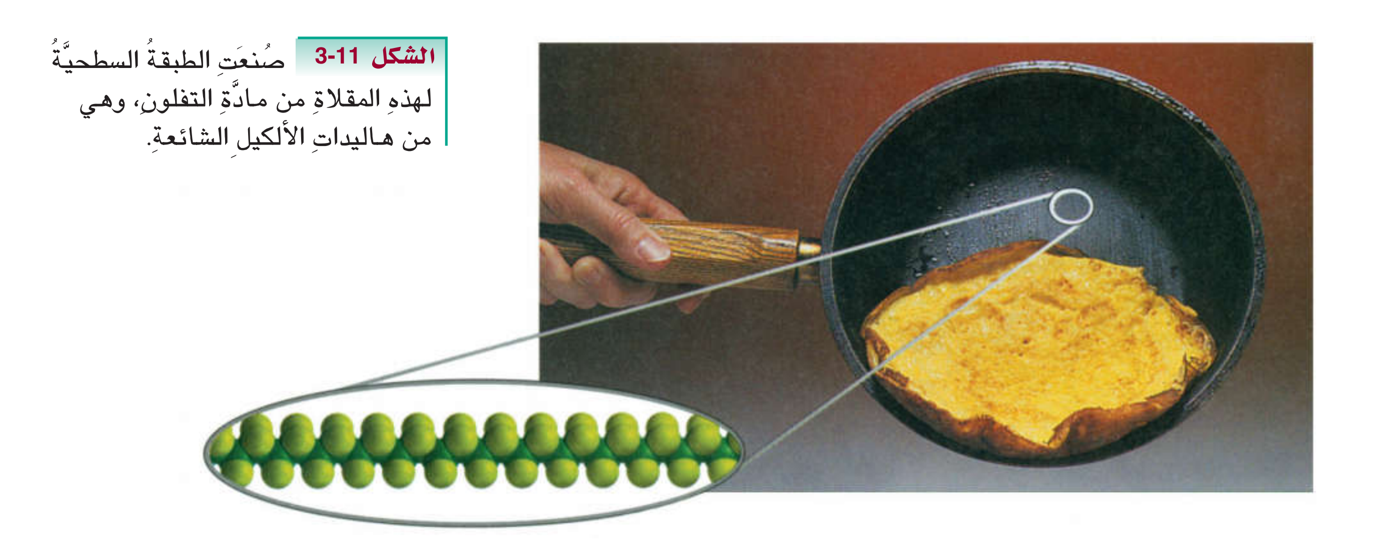
$$CCl_2F_2 \xrightarrow{\text{أشعة الشمس}} Cl + CClF_2$$

تهاجمُ ذرّاتُ الكلورِ المتحرِّرةُ جزيئاتِ الأوزونِ O_3 الموجودةُ في طبقاتِ الجوِّ العليا، فتحوِّلُها إلى أكسجينٍ ثنائيِّ الذرَّةِ.

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$



الشكل 11-2 أدّى استنزافُ الأوزونِ في طبقاتِ الجوِّ العليا فوقَ القطبِ الجنوبيِّ Antarctica، إلى تكوينِ طبقةٍ ذاتِ تركيزٍ منخفضٍ جدًّا من الأوزونِ سُمِّيتْ ثقبَ الأوزونِ. تشيرُ المنطقةُ السوداءُ فوقَ القطبِ الجنوبيِّ إلى المنطقةِ ذاتِ تركيزِ الأوزونِ الأكثرِ تدنيًا، نتيجةَ استنزافِهِ.



الشكل 3-11 صُنعَتِ الطبقةُ السطحيَّةُ لهذهِ المقلاةِ من مادَّةِ التفلونِ، وهي من هاليداتِ الألكيلِ الشائعةِ.

ويعادُ توليدُ ذرّاتِ الكلورِ كالتالي:

$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$$

بهذهِ الطريقةِ يُتاحُ لذرَّةِ كلورٍ واحدةٍ أن تدمِّرَ آلافَ الجزيئاتِ من الأوزونِ.

لقد أدى استنزافُ الأوزونِ في طبقاتِ الجوِّ العليا إلى تكوينِ طبقةٍ فوقَ القطبِ الجنوبيِّ Antarctica، تدنّى فيها تركيزُه، سُمِّيَتْ ثقبَ الأوزونِ. من المعروفِ أن جزيئاتِ الأوزونِ تمتصُّ الأشعَّةَ فوقَ البنفسجيَّةِ من أشعَّةِ الشمسِ، مانعةً بذلك معظمَ هذه الأشعَّةِ من الوصولِ إلى سطحِ الأرضِ. ومعروفٌ أن الأشعَّةَ فوقَ البنفسجيَّةِ تسبِّبُ سرطانَ الجلدِ في الإنسانِ، وقتلَ بعضِ أنواعِ الكائناتِ المجهريَّةِ، إلى جانبِ تدميرِ الأنسجةِ النباتيَّةِ والحيوانيَّةِ، موقعةً أضرارًا فادحةً في هذهِ الأحياءِ. وبما أن CFCs هي المسبِّبُ الرئيسُ لاستنزافِ الأوزونِ، فقد وقَّعَتْ أكثرُ من مئةِ دولةٍ عامَ 1987 على اتِّفاقٍ لتقليلِ إنتاجِ هذه المادَّةِ.

ومن هاليداتِ الألكيلِ الأخرى، رباعيُّ فلورو إيثينِ tetrafluoroethene، أو C_2F_4. تترابطُ جزيئاتُ C_2F_4 على شكلِ سلسلةٍ طويلةٍ لتكوينِ مادَّةٍ تُعرفُ بالاسمِ التجاريِّ التفلونِ Teflon. ولاحتواءِ هذهِ المادَّةِ على رابطةِ كربونٍ–فلورٍ غيرِ قابلةٍ للتفاعلِ، أصبحَ التفلونُ غيرَ قابلٍ للتفاعلِ، ومستقرًّا عندَ درجةِ حرارةِ 325°C. إضافةً إلى ذلك يتَّصفُ التفلونُ بمُعاملِ احتكاكٍ منخفضٍ جدًّا، مما يعني أن الموادَّ الأخرى تنزلقُ بسهولةٍ عن سطحِه. وقد جعلَتْ منه هذه الخاصَّةُ مادَّةً مهمَّةً في تصنيعِ أجزاءِ الآلاتِ المقاومةِ للحرارةِ، والتي لا يمكنُ تشحيمُها بالإضافةِ إلى استخدامِه في تصنيعِ أدواتِ المطبخِ ذاتِ السطوحِ التي لا يلتصقُ فيها الطعامُ، كالمقلاةِ المبيَّنةِ في الشكلِ 3-11.

الإيثرات

الإيثراتُ ethers *مركّباتٌ عضويَّةٌ ترتبطُ فيها مجموعتا ألكيل بذرَّةِ أكسجينٍ واحدةٍ.* ويمكنُ تمثيلُ الإيثراتِ بالصيغةِ $R–O–R'$. في هذه الصيغةِ قد تكونُ R' مشابهةً لـ R أو مختلفةً عنها. وفيما يلي قواعدُ تسميةِ الإيثراتِ البسيطةِ.

تسميةُ الإيثراتِ

1. **تُذكَرُ كلمةُ «إيثر» في نهايةِ الاسمِ.**
2. **أضفْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيلِ.** وإذا وُجِدتْ مجموعتانِ مختلفتانِ من مجموعاتِ الألكيلِ، رتِّبْ أسماءَهَا بحسبِ الحروفِ الأبجديةِ الإنجليزيَّةِ، قبلَ كلمةِ إيثر. وإذا كانت مجموعتا الألكيلِ متشابهتين، تضافُ البادئةُ ثنائيَّ إلى اسم مجموعةِ الألكيلِ قبلَ اسم إيثر.
3. **اتركْ مسافةً مناسبةً في الاسمِ.** يجبُ تركُ مسافةٍ بينَ أسماءِ مجموعاتِ الألكيلِ، وبينَ هذه المجموعاتِ وكلمةِ إيثر.

مسألةٌ نموذجية 11-2

سمِّ الإيثرَ المبيَّنَ أدناه.

$$CH_3–CH_2–O–CH_2–CH_3$$

الحلّ

1. ستأتي كلمةُ «إيثر» في نهايةِ الاسمِ.

إيثر

2. عيِّنِ اسمَ مجموعتَيِ الألكيلِ المرتبطتَيْن بذرَّةِ الأكسجينِ.

$$CH_3–CH_2–O–CH_2–CH_3$$

كلتا المجموعتَين من نوعِ الإيثيلِ. أضفِ البادئةَ ثنائيّ لتبيَّن وجودَ مجموعتَين من الإيثيلِ. ضعْ «ثنائيّ إيثيل» قبلَ كلمةَ «إيثر».

ثنائيّ إيثيل إيثر

يصبحُ الاسمُ الكاملُ على النحوِ التالي ثنائيّ إيثيل إيثر، وهو الإيثرُ الأكثرُ شيوعًا.

تمارينُ تطبيقية

1. سمِّ الإيثراتِ التاليةَ:

أ. $CH_3–CH_2–CH_2–O–CH_3$

ب. (حلقة خماسية)–O–(حلقة خماسية)

ج. $CH_3–O–CH_2–CH_2–CH_2–CH_3$

2. ارسمِ التركيبَ البنائيَّ المختصرَ لصيغِ الإيثراتِ التاليةِ:

أ. إيثيل بروبيل إيثر

ب. ثنائيّ هكسيل حلقيّ إيثر

ج. بيوتيل ميثيل إيثر

الجواب

1. أ. ميثيل بروبيل إيثر
ب. ثنائيّ بنتيل حلقيّ إيثر
ج. بيوتيل ميثيل إيثر

2. أ. $CH_3–CH_2–O–CH_2–CH_2–CH_3$
ب. (حلقة سداسية)–O–(حلقة سداسية)
ج. $CH_3–CH_2–CH_2–CH_2–O–CH_3$

الجدول 11-4 مقارنةُ درجاتِ غليانِ إيثرٍ وألكانٍ وكحولٍ

المركَّبُ	الكتلةُ الموليَّةُ	درجةُ الغليانِ (^oC)
ثنائيُّ إيثيل إيثر	74	34.6
بنتان	72	36.1
1-بيوتانول	74	117.7

خصائصُ الإيثراتِ واستخداماتُها

تتشابهُ ذوبانيَّةُ الإيثراتِ والكحولاتِ في الماءِ. مثلاً، يكونُ لكلٍّ من ثنائيّ إيثيل إيثر و 1-بيوتانول الكتلةُ الموليَّةُ نفسُها، ولهما أيضًا تقريبًا درجةُ الذوبانيَّةِ نفسُها في الماءِ: 6 g/100 g للأوّلِ و 7.4 g/100 g للثاني. تفسِّرُ هذا التشابهَ حقيقةُ أن الإيثرَ، كما هو الكحولُ، يمكنُ أن يكوِّنَ روابطَ هيدروجينيَّةً مع جزيئاتِ الماءِ.

وبالمقابلِ، تكونُ درجاتُ غليانِ الإيثراتِ أدنى بكثيرٍ من درجةِ غليانِ الكحولاتِ المساويةِ لها في الكتلةِ الموليَّةِ. لكنها تكونُ مساويةً تقريبًا لدرجةِ غليانِ الألكاناتِ. ويبدو هذا الميلُ واضحًا لدى إجراءِ المقارنةِ في الجدول 11-4. يمكنُ تفسيرُ سببِ هذا الميل أيضًا من خلالِ الرابطةِ الهيدروجينيَّةِ. فعلى عكسِ الكحولاتِ لا تكوِّنُ الإيثراتُ روابطَ هيدروجينيَّةً مع بعضِها لعدمِ احتوائِها على ذرَّةِ هيدروجينٍ مرتبطةٍ بذرَّةٍ عاليةِ السالبيَّةِ الكهربائيَّةِ. لذلك ليس هناك حاجةٌ إلى طاقةٍ إضافيَّةٍ لكسرِ الروابطِ الهيدروجينيَّةِ كي تغليَ الإيثراتُ.

وكما هي حالُ الألكاناتِ، فإن الإيثراتِ لا تكونُ مركَّباتٍ نشطةً. وتفسِّرُ هذه الخاصَّةُ استخدامَ الإيثرِ الشائعِ كمذيبٍ في عددٍ من التفاعلاتِ العضويَّةِ، حين يتعذَّرُ استخدامُ الماءِ كمذيبٍ.

يُعدُّ ميثيل ثالثي بيوتيل إيثر methyl-*tertiary*-butyl ether (MTBE) الأكثرَ استخدامًا بينَ مجموعةِ الإيثرِ، وهو أيضًا نوعٌ آخرُ من محسِّناتِ أوكتانِ الجازولينِ. وفي السابقِ كان رباعيُّ إيثيل الرصاص $(C_2H_5)_4Pb$ شائعَ الاستخدامِ لهذا الغرضِ. لكن، ولتزايدِ الاهتمامِ حولَ انبعاثاتِ الرصاصِ من عوادمِ السيّاراتِ إلى البيئةِ المحيطةِ، استُبدِلَ بهذهِ المادَّةِ (MTBE) وغيرُها من محسِّناتِ الأوكتانِ.

مراجعةُ القسم 11-1

1. اكتبِ الصيغةَ العامَّةَ بالإضافةِ إلى صنفِ كلٍّ من المركَّباتِ العضويَّةِ التاليةِ:

أ. $CH_3{-}OH$

ب. $CH_3{-}O{-}CH_3$

ج. $Br{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3$

2. سمِّ كلاًّ من المركَّباتِ التاليةِ:

أ. $CH_3{-}CH(OH){-}CH_3$

ب. $CH_3{-}O{-}CH_3$

ج. $CH_3{-}CH_2{-}CHF_2$

3. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ مما يلي:

أ. 1، 2-بروبانديول

ب. إيثيل ميثيل إيثر

ج. ثنائيّ كلورو ميثان

تفكيرٌ ناقد

4. تطبيقُ نماذج: رتِّبِ المركَّباتِ التاليةَ تنازليًّا تبعًا لدرجةِ الغليانِ: إيثيل ميثيل إيثر، الإيثانول، 1،2-إيثانديول، البيوتان، البروبان.

القســـم 2-11

مؤشّراتُ الأداءِ

- يتعرَّفُ الألدهيداتِ والكيتوناتِ والأحماضَ الكربوكسيليَّةَ والإستراتِ والأميناتِ، اعتمادًا على المجموعةِ الوظيفيَّةِ الموجودةِ في كلٍّ منها.
- يسمّي الألدهيداتِ والكيتوناتِ والأحماضَ الكربوكسيليَّةَ والإستراتِ والأميناتِ ويكتبُ الصيغَ البنائيَّةَ.
- يفسِّرُ خصائصَ الألدهيداتِ، والكيتوناتِ، والأحماضِ الكربوكسيليَّةِ، والإستراتِ، والأميناتِ، واستخداماتِها، اعتمادًا على تراكيبِها البنائيَّةِ.

أصنافٌ أخرى للمركَّباتِ العضويَّةِ

الألدهيداتُ والكيتوناتُ

تحتوي الألدهيداتُ والكيتوناتُ على مجموعةِ كربونيل، تظهرُ أدناه:

$$\overset{\displaystyle O}{\overset{\|}{-C-}}$$

يعودُ الفرقُ بين الألدهيداتِ والكيتوناتِ إلى موقعِ مجموعةِ الكربونيل. **الألدهيدات aldehydes** ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ ترتبطُ فيها مجموعةُ الكربونيل بذرَّةِ كربونٍ في طرفِ سلسلةِ ذرَّاتِ الكربون.*** **والكيتونات ketones** ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ ترتبطُ فيها مجموعةُ الكربونيل بذرَّاتِ كربونٍ تقعُ ضمنَ السلسلةِ.*** يمكنُ تعرُّفُ هذه الاختلافاتِ من الصيغِ العامَّةِ المبيَّنةِ أدناه:

$$\underset{\text{ألدهيد}}{R-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-H} \qquad \underset{\text{كيتون}}{R-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-R'}$$

إن قواعدَ IUPAC لتسميةِ الألدهيداتِ والكيتوناتِ، هي التاليةُ:

تسميةُ الألدهيداتِ

سَمِّ المركَّبَ الأمَّ. حدِّدِ السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ المحتويةَ على مجموعةِ كربونيلٍ. أضفِ المقطعَ –ال (al-) إلى نهايةِ اسمِ الألكانِ المقابلِ.

فيما يلي ثلاثةُ أمثلةٍ على تسميةِ الألدهيداتِ.

$$\underset{\text{ميثانال}}{H-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-H} \qquad \underset{\text{إيثانال}}{CH_3-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-H} \qquad \underset{\text{بروبانال}}{CH_3-CH_2-\overset{\overset{\displaystyle O}{\|}}{C}-H}$$

تسميةُ الكيتوناتِ

1. **سمِّ المركَّبَ الأمَّ.** حدِّدِ السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ المحتويةَ على مجموعةِ كربونيلٍ. أضفِ المقطعَ –ون (one-) إلى نهايةِ اسمِ الألكانِ المقابلِ.
2. **رقِّمْ ذرَّاتِ الكربونِ في السلسلةِ الأمِّ.** رقِّمْ ذرّاتِ الكربونِ في السلسلةِ بحيثُ يصبحُ لذرَّةِ الكربونِ في مجموعةِ الكربونيلِ أقلُّ رقمٍ ممكنٍ.
3. **أدخلْ رقمَ الموقعِ.** ضعْ رقمَ موقعِ الكربونيلِ في مقدِّمةِ الاسمِ.
4. **أضفِ الشرطاتِ.** افصلْ رقمَ الموقعِ عن الاسمِ بشرْطةٍ.

فيما يلي ثلاثةُ أمثلةٍ على أسماءٍ لبعضِ الكيتوناتِ.

$$CH_3-\overset{O}{\overset{||}{C}}-CH_3$$
2-بروبانون

$$CH_3-\overset{O}{\overset{||}{C}}-CH_2-CH_3$$
2-بيوتانون

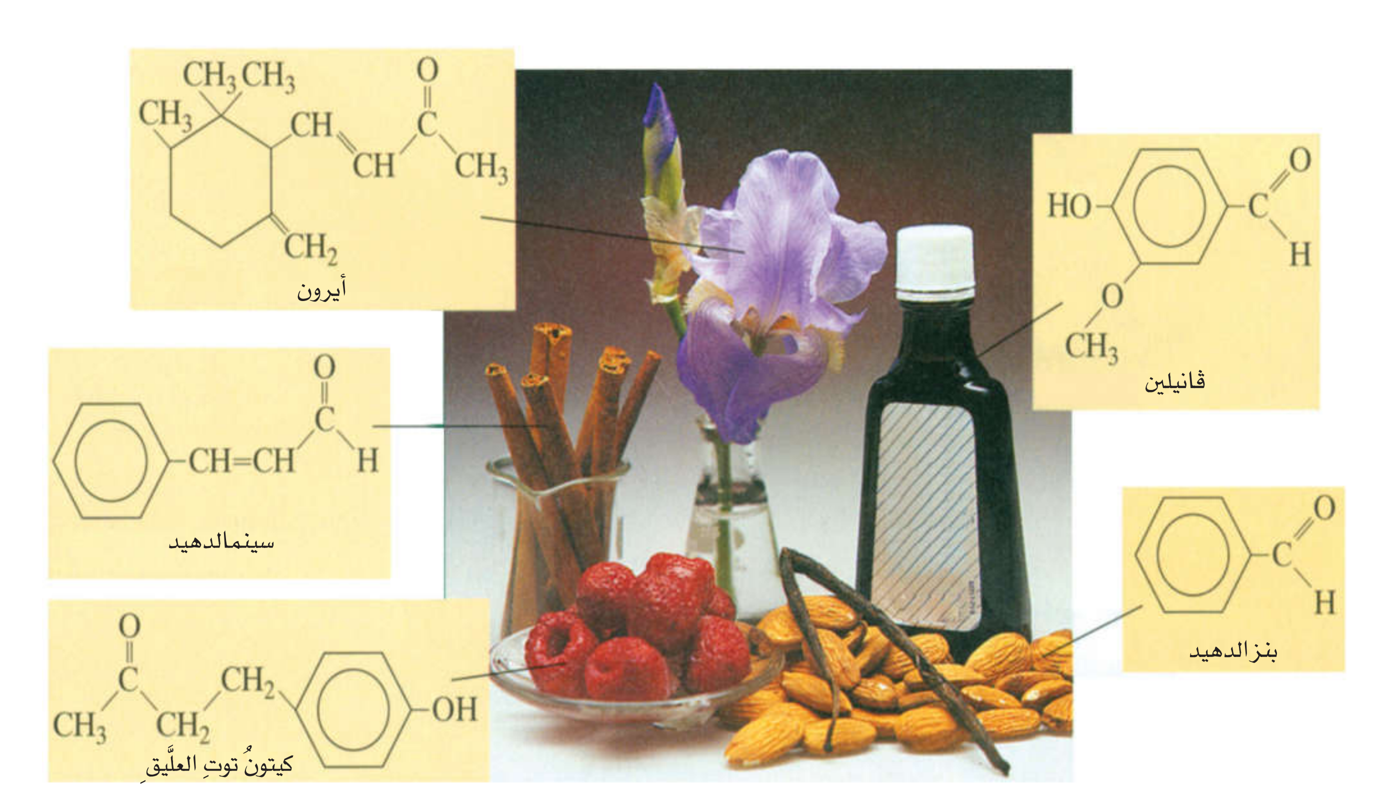
$$CH_3-CH_2-\overset{O}{\overset{||}{C}}-CH_2-CH_3$$
3-بنتانون

خصائصُ الألدهيداتِ والكيتوناتِ واستخداماتُهما

إن أبسطَ الألدهيداتِ هو الميثانالُ، الذي يُعرفُ أيضًا بالفورمالدهيدِ الذي شاعَ استخدامُه لحفظِ العيِّناتِ في مختبراتِ علمِ الأحياءِ، وله استخدامٌ صناعيٌّ مهمٌّ في إنتاجِ بلاستيكِ الباكلايت bakelite الذي يصنَّعُ من الفينولِ والفورمالدهيدِ كموادَّ أوَّليَّةٍ.

ومن أبسطِ الكيتوناتِ 2-بروبانون، الذي يُسمّى أيضًا الأسيتونَ. يدخلُ الأسيتونُ في تركيبِ بعضٍ من مزيلاتِ طلاءِ الأظافرِ، لأنه يذيبُ الموادَّ العضويَّةَ في طلاءِ الأظافرِ. غالبًا ما تكونُ الألدهيداتُ والكيتوناتُ مسؤولةً عن النكهاتِ في حياتِنا اليوميَّةِ. فالسينمالدهيدُ cinnamaldehyde، هو المسؤولُ عن نكهةِ القرفةِ cinnamon. يعطي الشكلُ 11-4 أمثلةً على نكهاتٍ مصدرُها الألدهيداتُ والكيتوناتُ.

الشكل 11-4 نكهاتٌ شائعةٌ مصدرُها الألدهيداتُ والكيتوناتُ.



الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ

الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ carboxylic acids ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ تحتوي على مجموعةِ الكربوكسيلِ الوظيفيَّةِ التي تأتي في طرفِ السلسلةِ الكربونيَّةِ.*** ويمكنُ تمثيلُ هذا الصنفِ من المركَّباتِ العضويَّةِ بالصيغةِ العامَّةِ المبيَّنةِ أدناه:

$$R{-}\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}{-}OH$$

وتتمُّ تسميةُ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ البسيطةِ بحسبِ نظامِ IUPAC على النحوِ التالي:

تسميةُ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ

سَمِّ المركَّبَ الأمَّ. حدِّدِ السلسلةَ المستمرَّةَ الأطولَ التي تحتوي على مجموعةِ الكربوكسيل. فإذا وجدَتْ مجموعةُ كربوكسيلٍ واحدةٌ، أضفِ البادئةَ حمض (acid) إلى اسمِ الألكانِ المقابلِ، والمقطعَ –ويك (-oic) في نهايةِ الاسم.

وفيما يلي ثلاثةُ أمثلةٍ على الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ.

$$H{-}\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}{-}OH$$
حمضُ الميثانويكِ

$$CH_3{-}\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}{-}OH$$
حمضُ الإيثانويكِ

$$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}{-}OH$$
حمضُ البيوتانويكِ

خصائصُ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ واستخداماتُها

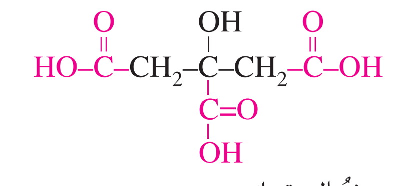
تتفاعلُ الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ، كما هي حالُ الأحماضِ غيرِ العضويَّةِ، وتفقدُ أيونَ الهيدروجينِ فتصبحُ أيونًا مشحونًا بالشحنةِ السالبةِ، في الماءِ.

$$R{-}\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}{-}OH \overset{H_2O}{\rightleftarrows} R{-}\overset{\overset{\large O}{\|}}{C}{-}O^- + H^+$$

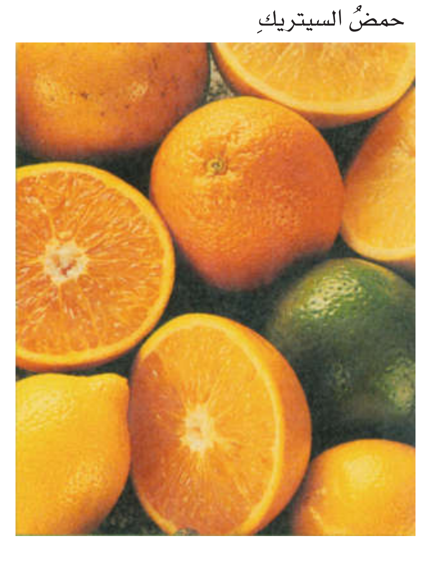
تكونُ الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ أضعفَ بكثيرٍ من الأحماضِ غيرِ العضويَّةِ، كحمضِ الهيدروكلوريكِ، وحمضِ الكبريتيكِ، وحمضِ النيتريكِ. فحمضُ الأسيتيكِ (الخل) هو حمضٌ كربوكسيليٌّ ضعيفٌ، ويسمّى وفقًا لـ IUPAC حمضَ الإيثانويكِ.

ويوجدُ عددٌ من الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ طبيعيًّا في النباتاتِ والحيواناتِ. فالحمضيّاتُ، المبيَّنةُ في الشكل 11-5، مثلاً، تحتوي على حمضِ السيتريكِ citric acid. ويظهرُ الجدولُ 11-5 أمثلةً أخرى على ذلك. تُستخدمُ الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ كمضافاتٍ للأغذيَّةِ. فحمضُ الإيثانويكِ وحمضُ السيتريكِ يستخدمانِ في الطعامِ لإعطائِه مذاقًا حامضيًّا. وتُستخدمُ أحماضُ البنزويكِ والبروبانويكِ، والسوربيكِ كموادَّ حافظةٍ للطعامِ، وذلك لقدرتِها على تدميرِ الكائناتِ المجهريَّةِ المسبِّبةِ لتلفِ الطعامِ.

إن أكثرَ الأحماضَ الكربوكسيليَّةِ شيوعًا، هي حمضُ الميثانويكِ وحمضُ الإيثانويكِ، لإمكانيَّةِ تصنيعِهما بكلفةٍ منخفضةٍ، والاستفادةِ منهما كمادَّةٍ أوَّليَّةٍ في عددٍ من الصناعاتِ الكيميائيَّةِ. يُستخدمُ حمضُ الإيثانويكِ مثلاً، في إنتاجِ البولي ڤينيل أسيتات polyvinyl acetate (PVA) المستخدمِ في صناعةِ الدهاناتِ، والموادِّ اللاصقةِ، وطلاءِ الأقمشةِ الخارجيِّ.



حمضُ السيتريكِ



الشكل 11-5 يوجدُ حمضُ السيتريكِ في الحمضيّاتِ ويحتوي على ثلاثِ مجموعاتِ كربوكسيلٍ موضَّحةٍ باللونِ الأحمرِ في الصيغةِ البنائيَّةِ.

الجدول 5-11 بعضُ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ ومصادرُها الطبيعيَّةُ

حمضُ الكربوكسيل	الصيغةُ البنائيَّةُ	المصدر
حمضُ الميثانويكِ methanoic acid	$H{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}OH$	النمل
حمضُ البيوتانويكِ butanoic acid	$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}OH$	الزبدةُ الفاسدةُ
حمضُ الهكسانويكِ hexanoic acid	$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_2{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}OH$	القشطةُ، زيتُ جوزِ الهندِ، زيتُ النخيلِ
حمضُ اللاكتيكِ lactic acid	$CH_3{-}\overset{\overset{\displaystyle OH}{\|}}{C}H{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}OH$	اللبنُ، الدمُ، سائلُ العضلاتِ
حمضُ الماليكِ malic acid	$OH{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}CH_2{-}\overset{\overset{\displaystyle OH}{\|}}{C}H{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}OH$	التفاح
حمضُ الأوكساليكِ oxalic acid	$HO{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}OH$	الراوَنْد (عشبةٌ طبّيَّة)

الإسترات

الإستراتُ esters ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ تحتوي على مجموعاتِ كربوكسيلٍ حلَّت فيها مجموعةُ ألكيلٍ محلَّ هيدروجينِ مجموعةِ الهيدروكسيل.***

الصيغةُ العامَّةُ للإستراتِ هي التاليةُ:

$$R{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}O{-}R'$$

ونظامُ IUPAC لتسميةِ الإستراتِ البسيطةِ هو التالي:

تسميةُ الإستراتِ

1. **سَمِّ المركَّبَ الأمَّ.** سمِّ الحمضَ الكربوكسيليَّ الذي تكوَّنَ منه الإسترُ (راجع الصفحةَ 314). احذفِ البادئةَ حمض، وغيِّرِ المقطعَ –ويك في نهايةِ اسمِ الحمضِ إلى –وات (-oate). هذا سيعطي الجزءَ الثانيَ من اسمِ الإسترِ.
2. **أضفِ اسمَ مجموعةِ الألكيل.** حدِّدِ اسمَ مجموعةِ الألكيلِ التي حلَّتْ محلَّ هيدروجينِ مجموعةِ الهيدروكسيل، وأضفِ اسمَ مجموعةِ الألكيلِ إلى مقدِّمةِ الاسم.

فيما يلي مثالانِ على تسميةِ الإستراتِ.

$$CH_3{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}O{-}CH_2{-}CH_3$$

إيثيل إيثانوات

$$CH_3{-}CH_2{-}CH_2{-}\overset{\overset{\displaystyle O}{\|\|}}{C}{-}O{-}CH_2{-}CH_3$$

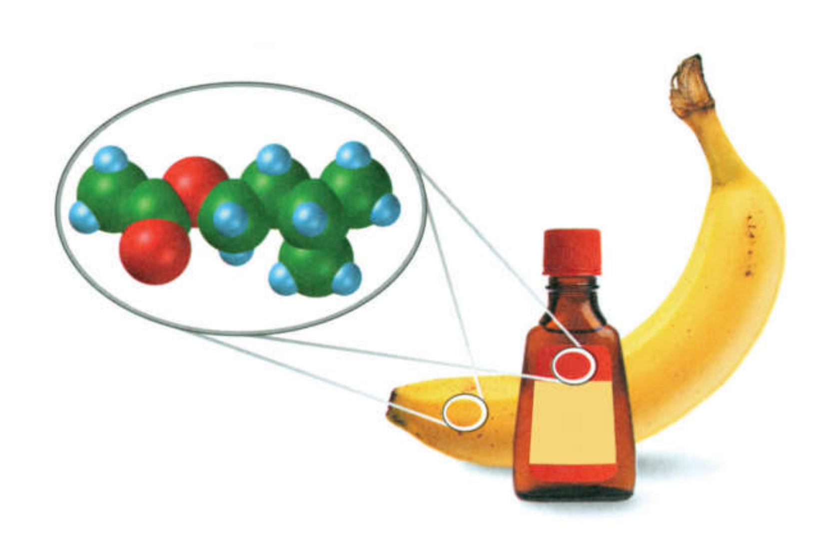
إيثيل بيوتانوات

الجدول 6-11 النكهاتُ الشائعةُ التي تصدرُها بعضُ الإستراتِ

الإستر	الصيغةُ البنائيَّةُ	النكهة
إيثيلُ بيوتانواتِ ethyl butanoate	$CH_3-CH_2-CH_2-C(=O)-O-CH_2-CH_3$	الأناناس
جيرانيولُ الفورماتِ geraniol formate	$H-C(=O)-O-CH_2-CH=C(CH_3)-CH_2-CH_2-CH=C(CH_3)-CH_3$	الورد
ميثيلُ الأنثرانيكلاتِ methyl anthraniclate	$C_6H_4(NH_2)-C(=O)-O-CH_3$	الياسمينُ، وعصيرُ العنبِ
لينليلُ الأسيتاتِ linalyl acetate	$CH_3-C(=O)-O-C(CH_3)(CH=CH_2)-CH_2-CH_2-CH=C(CH_3)-CH_3$	الخزامى

خصائصُ الإستراتِ واستخداماتُها

الإستراتُ شائعةٌ عادةً في النباتاتِ وهي مسؤولةٌ عن بعضِ النكهاتِ المميَّزةِ فيها. وهذا ما نفهمُه من قولِهِ تعالى: «يُسْقَى بِمَاءٍ واحِدٍ ونُفَضِّلُ بَعْضَهَا على بَعْضٍ في الأُكُلِ»، سورةُ الرعدِ، الآيةُ 4. يوضحُ الجدولُ 6-11 بعضَ هذه الإستراتِ والنكهاتِ التي تكوِّنُها. ويذكرُ أن هذه المركَّباتِ كانَ يجري الحصولُ عليها في الماضي من مصادرَ طبيعيَّةٍ فقط. ويمكنُ تحضيرُ هذه المركَّباتِ الطبيعيَّةِ وغيرِها، لاستخدامِها كمنكِّهاتٍ للأغذيةِ. ويبيِّنُ الشكلُ 6-11 تركيبَ أيزوأميلِ الأسيتاتِ isoamyl acetate الذي يوجَدُ في الموزِ والذي يستخدمُ كمنكِّهٍ صناعيٍّ.



الشكل 6-11 يمكنُ تحضيرُ الإسترِ الموجودِ في الموزِ، واستخدامُهُ كمُكسبٍ للطعمِ.

الأمينات

الأميناتُ amines ***مركَّباتٌ عضويَّةٌ مشتقَّةٌ من الأمونيا بإحلالِ مجموعةِ ألكيل أو أكثرَ محلَّ الهيدروجينِ فيها***. تمثَّلُ الأميناتُ بالصيغةِ العامَّةِ التاليةِ:

$$R\text{–N–}R''$$
$$\ \ |$$
$$R'$$

لاحظْ أن المجموعةَ الوظيفيَّةَ (–N–) لا تحتوي على أكسجين. تُسمّى الأميناتُ عادةً بأسماءٍ شائعةٍ، وليسَ وفقَ نظامِ IUPAC. وفيما يلي الخطواتُ المتَّبعةُ في تسميةِ الأميناتِ.

تسميةُ الأميناتِ

1. اكتبْ كلمةَ أمين (amine) في نهايةِ الاسمِ.
2. **أضفْ اسمَ مجموعةِ الألكيل.** رتِّبْ أسماءَ مجموعاتِ الألكيلِ المرتبطةِ بذرَّةِ النيتروجينِ وفقًا لتسلسلِ الحروفِ الأبجديَّةِ الإنجليزيَّةِ. أضفِ البادئةَ ثنائي أو ثلاثي قبلَ اسمِ المجموعةِ إذا كانَت اثنتَيْن أو ثلاثًا، من النوعِ نفسِه. اجمعْ هذه الأسماءَ في مقدِّمةِ الكلمةِ أمين.

فيما يلي ثلاثةُ أمثلةٍ على تسميةِ بعضِ الأميناتِ.

$CH_3\text{–N–H}$ (N–H)	$CH_3\text{–N–H}$ (N–$CH_2\text{–}CH_3$)	$CH_2\text{–N–}CH_3$ (N–CH_3)
ميثيل أمين	إيثيل ميثيل أمين	ثلاثي ميثيل أمين
(أمينٌ أوليٌّ)	(أمينٌ ثانويٌّ)	(أمينٌ ثالثيٌّ)

تُصنَّفُ الأميناتُ كأميناتٍ أوليَّةٍ وثانويَّةٍ وثالثيَّةٍ، بالاعتمادِ على عددِ ذرّاتِ الهيدروجينِ في جزيءِ الأمونيا، التي استبدلَتْ بها مجموعاتُ الألكيل، كما هو مبيَّنٌ في التراكيبِ البنائيَّةِ أعلاه. في **الأمينِ الأوليِّ primary amine** ***حلَّت محلَّ ذرَّةِ هيدروجينٍ واحدةٍ من جزيءِ الأمونيا مجموعةُ ألكيل.*** وفي **الأمينِ الثانويِّ secondary amine** ***حلَّت محلَّ ذرَّتَيْ هيدروجينٍ من جزيءِ الأمونيا مجموعتا ألكيل.*** وفي **الأمينِ الثالثيِّ tertiary amine**، ***حلَّت محلَّ ذرّاتِ الهيدروجينِ الثلاثِ في جزيءِ الأمونيا ثلاثُ مجموعاتِ ألكيلٍ.***

خصائصُ الأميناتِ واستخداماتُها

تعتمدُ الخصائصُ الكيميائيَّةُ للأميناتِ بشكلٍ كبيرٍ على التركيبِ الإلكترونيِّ لذرَّةِ النيتروجينِ التي تحتوي على زوجٍ من الإلكتروناتِ غيرِ المشتركةِ. تجعلُ هذه المنطقةُ ذاتُ الشحنةِ السالبةِ من الأميناتِ قواعدَ ضعيفةً في المحاليلِ المائيَّةِ. ويجذبُ زوجُ الإلكتروناتِ غيرِ المشتركةِ ذرَّةَ هيدروجينٍ ذاتِ شحنةٍ موجبةٍ في جزيءِ ماءٍ، فترتبطُ ذرَّةُ الهيدروجينِ مع الأمينِ مكوِّنةً أيونًا موجبَ الشحنةِ، مخلِّفةً أيونَ الهيدروكسيدِ.

$$R\text{–}\ddot{N}\text{–}R''\,(R') + H\text{–O–H} \rightleftarrows R\text{–}\overset{H^+}{N}\text{–}R''\,(R') + OH^-$$

بتراكوتوكسينين A

الشكل 11-7 يُنتجُ الضفدعُ المرقَّطُ أميناتٍ سامَّةً منها: البتراكوتوكسينين A ، batrachotoxinin A ، الذي يدمِّرُ الخلايا العصبيَّةَ. وتظهرُ في الشكل ذرَّةُ النيتروجين في جزيءِ الأمينِ ملوَّنةً باللونِ الأحمرِ.

من الأمثلةِ المميَّزةِ على هذا التفاعلِ، نوعانِ من الأميناتِ الحلقيَّةِ الطبيعيَّةِ السامَّةِ يعرفانِ بالبتراكوتوكسين batrachotoxin و البتراكوتوكسينين A، batrachotoxinin A، ينتجُهما الضفدعُ المرقَّطُ السامُّ الذي يعيشُ في الغاباتِ الكولومبيَّةِ المطيرةِ، والمبيَّنِ في الشكلِ 11-7. يكتسبُ هذانِ الأمينانِ في المحاليلِ المائيَّةِ بروتونَين ليصبحا أيونَيْن موجبَيْن. وبما أن هذَيْنِ الأيونَيْن يحملانِ الشحنةَ ذاتَها، كما في أيوناتِ الصوديومِ في الجهازِ العصبيِّ، فإنهما يسلكانِ السلوكَ نفسَه، لا سيَّما وأن أيوناتِ batrachotoxin تتوغَّلُ خلالَ فتحاتٍ في الخلايا العصبيَّةِ تُسمّى قنواتِ الصوديومِ. وبما أن هذه الأيوناتِ أكبرُ بكثيرٍ من أيوناتِ الصوديومِ العاديَّةِ، فإنها تقومُ بإجبارِ قنواتِ الصوديومِ على البقاءِ في وضعِ انفتاحٍ يسمحُ لأيوناتِ الصوديومِ أن تغمرَ الخليَّةَ العصبيَّةَ. تؤدّي هذه العمليَّةُ إلى استمرارِ الخليَّةِ العصبيَّةِ في نقلِ الإشاراتِ العصبيَّةِ دونَ انقطاعٍ، مما يؤدّي إلى موتِ الخليَّةِ بسرعةٍ. فسبحانَ الذي أعطى كلَّ شيءٍ خلقَه ثمَّ هدى.

الأميناتُ شائعةٌ في الطبيعةِ، وغالبًا ما تتكوَّنُ خلالَ تحلُّلِ البروتيناتِ في خلايا الحيوانِ، وتتميَّزُ برائحتِها الكريهةِ كما في الجثثِ المتحلِّلةِ والسمكِ الفاسدِ والغائطِ.

ويحتوي صنفُ المركَّباتِ العضويَّةِ المعروفةِ بأشباهِ القلويّاتِ alkaloids على أميناتٍ أيضًا. وهي أميناتٌ طبيعيَّةٌ تنتجُها نباتاتٌ ذاتُ تأثيرٍ فسيولوجيٍّ على الحيواناتِ. ومن الأمثلةِ على أشباهِ القلويّاتِ، الكافيينُ caffeine، والنيكوتينُ nicotine، والمورفينُ morphine، والكونينُ coniine الموجودُ في نباتِ الشوكرانِ السامِّ. ولأشباهِ القلويّاتِ تركيبٌ بنائيٌّ كيميائيٌّ معقَّدٌ، كما هو موضَّحٌ في التركيبِ البنائيِّ للمورفينِ، أدناه:

المورفين (أمينٌ ثالثيٌّ) morphine

يلخّصُ الجدولُ 11-7 المجموعاتِ الوظيفيَّةَ والصيغَ العامَّةَ لأصنافِ المركَّباتِ العضويَّةِ التي نوقشَتْ في القسمَيْن 11-1 و 11-2.

الجدول 11-7 أصنافُ المركَّباتِ العضويَّةِ

الصنف	المجموعةُ الوظيفيَّةُ	الصيغةُ العامَّةُ
الكحول	$-OH$	$R-OH$
هاليدُ الألكيلِ	$-X\ (X = F ، Cl ، Br ، I)$	$R-X$
الإيثر	$-O-$	$R-O-R'$
الألدهيد	$-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-H$	$R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-H$
الكيتون	$-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-$	$R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-R'$
الحمضُ الكربوكسيليُّ	$-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-OH$	$R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-OH$
الإستر	$-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-$	$R-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-R'$
الأمين	$-\underset{\vert}{N}-$	$R-\underset{\underset{R'}{\vert}}{N}-R''$

مراجعةُ القسمِ 2-11

1. حدِّدِ الصيغةَ العامَّةَ والمجموعةَ الوظيفيَّةَ، ثمَّ صنِّفِ المركَّباتِ العضويَّةَ التالية:

أ. $CH_3-CH_2-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-OH$

ب. $CH_3-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-H$

ج. $CH_3-CH_2-NH_2$

د. $CH_3-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-O-CH_2-CH_3$

هـ. $CH_3-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-CH_3$

2. اكتبِ اسمَ كلٍّ مما يلي:

أ. $CH_3-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-CH_2-CH_2-CH_3$

ب. $CH_3-CH_2-CH_2-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-OH$

ج. $CH_3-NH-CH_3$

3. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ مما يلي:

أ. إيثيل إيثانوات

ب. ثلاثيّ إيثيل أمين

ج. بيوتانال

4. ما أوجهُ الشبهِ والاختلافِ بينَ الألدهيداتِ والكيتوناتِ؟

5. قارنْ بينَ قوَّةِ الأحماضِ العضويَّةِ وقوَّةِ الأحماضِ غيرِ العضويَّةِ.

6. بيِّنِ التفاعلَ الذي يحدثُ لدى ذوبانِ الأميناتِ في الماءِ.

تفكيرٌ ناقد

7. **تطبيقُ نماذج:** حدِّدْ هويَّةَ المجموعاتِ الوظيفيَّةِ في التركيبِ البنائيِّ للفانيلين المبيَّنِ في الشكل 11-4.

8. **علِّلْ:** تعملُ الأميناتُ التي ينتجُها الضفدعُ المرقَّطُ السامُّ على موتِ الخلايا العصبيَّةِ.

وقودُ السيّاراتِ (الجازولين) والبيئةُ

علمْتَ أن من منتجاتِ تكريرِ النفطِ مادَّةً تسمّى الجازولينَ تستخدمُ وقودًا للسيارات، وتتكوَّنُ من مزيجٍ من الألكاناتِ المستقيمةِ والمتفرِّعةِ، وتحوي قليلاً من البنزين C_6H_6 ومشتقّاتِه. ولو استعملَ الجازولينُ المأخوذُ من أبراجِ التجزئةِ في مصنعِ تكريرِ النفطِ مباشرةً في تسييرِ السيّاراتِ لأدّى ذلك إلى تلفِ محرِّكِ السيّارة، أو على الأقلِّ قصرِ عمرِه. ذلك أن احتراقَ هذا الجازولين داخلَ المحرِّكِ لن يكونَ سلسًا، بل يرافقُه ارتجاجٌ وخبطٌ في المحرِّكِ لأنّ سلاسةَ احتراقِ الجازولين تعتمدُ على الصيغةِ البنائيَّةِ للألكاناتِ التي يحويها. فالألكاناتُ المتفرّعةُ هي الأفضلُ، والمستقيمةُ هي الأسوأُ. ولهذا تمَّ إعدادُ مقياسٍ لسلاسةِ احتراقِ الجازولينِ عُرِفَ بمقياسِ رقمِ الأوكتانِ octane number، وأعطيَ أسلسُ الألكاناتِ احتراقًا (الأيزو أوكتان المتفرِّعُ) رقمَ الأوكتان 100، والأوكتانُ العاديُّ الرقمَ صفرًا. وأصبحَ من المتعارفِ عليه أن الجازولينَ ذا رقمِ الأوكتانِ 95 فأكثرَ، يعدُّ ممتازًا، في حين أن رقمَ الأوكتانِ في بعضِ البلدانِ قد يكونُ 90 أو دونها، ويعتبرُ ممتازًا. فأصبحَ رقمُ الأوكتانِ يعكسُ، إلى حدٍّ ما، مستوى الرفاهيَّةِ في البلدِ المعنيِّ. ولكن، هل يمكنُ معالجةُ الجازولينِ المنخفضِ رقمِ الأوكتانِ بحيثُ يصبحُ ممتازًا (مرتفعَ رقمِ الأوكتانِ)؟ الجواب: نعم.

فقد وجدَ أن رباعيّ إيثيل الرصاص $(C_2H_5)_4Pb$ من شأنِه، إذا أضيفَ إلى الوقودِ بمقاديرَ قليلةٍ جدًّا أن يرفعَ رقمَ الأوكتانِ فيه. وعلى الرغمِ من الأضرارِ المعروفةِ لمركَّباتِ الرصاصِ على البيئةِ، فقد استمرَّ الناسُ في استخدامِ الجازولينِ المعالجِ بالرصاصِ. غير أن تزايدَ عددِ السيّاراتِ في الطرقاتِ، وبالتالي تعاظمَ ما ينبعثُ منها من ملوِّثاتٍ في الهواءِ، وخصوصًا في المدنِ المزدحمةِ بالسكّانِ، أدّى إلى تزايدِ شعورِ المواطنين في كلِّ بلدٍ بضرورةِ وضعِ حدٍّ لهذا التلوّثِ المتزايدِ، فوُضعَتْ في الدولِ المتطوِّرةِ قوانينُ تحدُّ من تلويثِ الهواءِ بالغازاتِ المنبعثةِ من السيّاراتِ، وأهمُّها، كما تعلمُ: أوّلُ أكسيدِ الكربون، أكاسيدُ النتيروجين، الأبخرةُ العضويَّةُ المتطايرةُ، ومركَّباتُ الرصاصِ المتطايرةُ (وهي في الغالبِ على شكلِ كلوريدِ الرصاصِ $PbCl_2$). ومن الجديرِ بالذكرِ أنّ المركَّباتِ العضويَّةَ المتطايرةَ تتضمَّنُ أبخرةَ مادَّةِ البنزينِ C_6H_6 المعروفِ بتسبُّبِه في الإصابةِ بالسرطانِ.

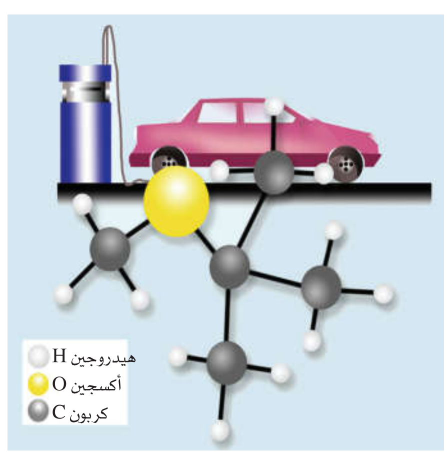
واتُّخِذَتِ الإجراءاتُ التاليةُ للحدِّ من تلوّثِ الهواءِ بسببِ استخدامِ الجازولين:

1. الخفضُ من كمِّيَّةِ الموادِّ العضويَّةِ المتطايرةِ بمنعِ استخدامِ ألكاناتٍ يقلُّ عددُ ذرّاتِ الكربونِ في الجزيءِ الواحدِ منها عن 6 ذرّاتٍ.
2. منعُ استخدامِ الجازولينِ الذي تزيدُ فيه نسبةُ البنزينِ عن 1%.
3. إجبارُ مستخدمي السيّاراتِ على تركيبِ محوِّلاتٍ كيميائيَّةٍ في أنبوبِ العادمِ تنقّي نواتجَ احتراقِ الجازولينِ من أوّلِ أكسيدِ الكربونِ وأكاسيدِ النيتروجينِ والمركَّباتِ العضويَّةِ المتطايرةِ.
4. ضرورةُ احتواءِ الجازولينِ على مادَّةٍ عضويَّةٍ تحتوي على الأكسجينِ ضمنَ جزيئاتِها بحيثُ لا تقلُّ نسبةُ الأكسجينِ في الجازولينِ عن 2% وزنًا.

واتَّضحَ عندَ تطبيقِ هذه الإجراءاتِ أن هناكَ مشكلةً كبرى تحولُ دونَ الاستفادةِ التامَّةِ منها، ذلك أن مركَّباتِ الرصاصِ المنبعثةَ مع نواتجِ احتراقِ الجازولينِ تسمِّمُ المحوِّلاتِ الكيميائيَّةَ في أنبوبِ العادمِ وتعطِّلُ عملَها. وربَّ ضارَّةٍ نافعةٌ، فقد اضطرَّتْ مصانعُ السيّاراتِ إلى الاستغناءِ عنها كمادَّةٍ رافعةٍ لرقمِ الأوكتانِ، وبدأ البحثُ عن البديلِ. وكان أن وُجدَ بديلٌ يصطادُ عصفورَيْن بحجرٍ واحدٍ، ألا وهو مادَّةُ ميثيل ثالثي بيوتيل إيثر MTBE التي لا ترفعُ رقمَ الأوكتانِ فحسب (وبكفاءةٍ أعلى من مركَّباتِ الرصاصِ) بلْ تحتوي على الأكسجينِ في جزيئاتِها بقدرٍ يفي بالحدِّ المطلوبِ لتحقيقِ الاحتراقِ الكاملِ للجازولينِ دون تكوُّنِ أوّلِ أكسيدِ الكربونِ. ويدورُ الآنَ في الأوساطِ الصناعيَّةِ والعلميَّةِ جدلٌ حولَ الآثارِ البيئيَّةِ لاستخدامِ مادَّةِ MTBE، والمسلسلُ مستمرٌّ.

أسئلة

1. ما المقياسُ الذي يمثِّلُه رقمُ الأوكتانِ؟
2. لرفعِ رقمِ الأوكتانِ، ما خصائصُ MTBE التي تجعلُه بديلاً أفضلَ من رباعي إيثيل الرصاص؟



ميثيل ثالثي بيوتيل إيثر MTBE يُمزجُ مع الوقودِ ليحسِّنَ من احتراقِه.

القسم 11-3

التفاعلاتُ العضويَّة

مؤشّراتُ الأداءِ

- يميِّزُ بين التفاعلاتِ العضويَّةِ التاليةِ: الاستبدالِ، الإضافةِ، التكاثفِ، الحذفِ.
- يعطي أمثلةً على التفاعلاتِ العضويَّةِ: الاستبدالِ، الإضافةِ، التكاثفِ، الحذفِ.

تفاعلاتُ الاستبدالِ

إن تفاعلَ الاستبدالِ substitution reaction ***هو التفاعلُ الذي تحلُّ فيه محلَّ ذرَّةٍ أو أكثرَ من ذرَّاتِ الجزيءِ ذرَّةٌ أو مجموعةُ ذرَّاتٍ أخرى***. ويعدُّ التفاعلُ بين الألكانِ، كالميثان، والهالوجينِ، كالكلورِ، لتكوينِ هاليدِ الألكيلِ، مثالاً على هذا النوعِ من التفاعلِ. لاحظْ أن ذرَّةَ الكلورِ في هذا التفاعلِ تحلُّ محلَّ ذرَّةِ هيدروجينٍ في جزيءِ الميثانِ، كالتالي:

$$\underset{\text{ميثان}}{H-\overset{H}{\underset{H}{|}}{C}-H} + \underset{\text{كلور}}{Cl-Cl} \xrightarrow{h\nu} \underset{\text{كلورو ميثان}}{H-\overset{H}{\underset{H}{|}}{C}-Cl} + \underset{\text{كلوريدُ الهيدروجين}}{H-Cl}$$

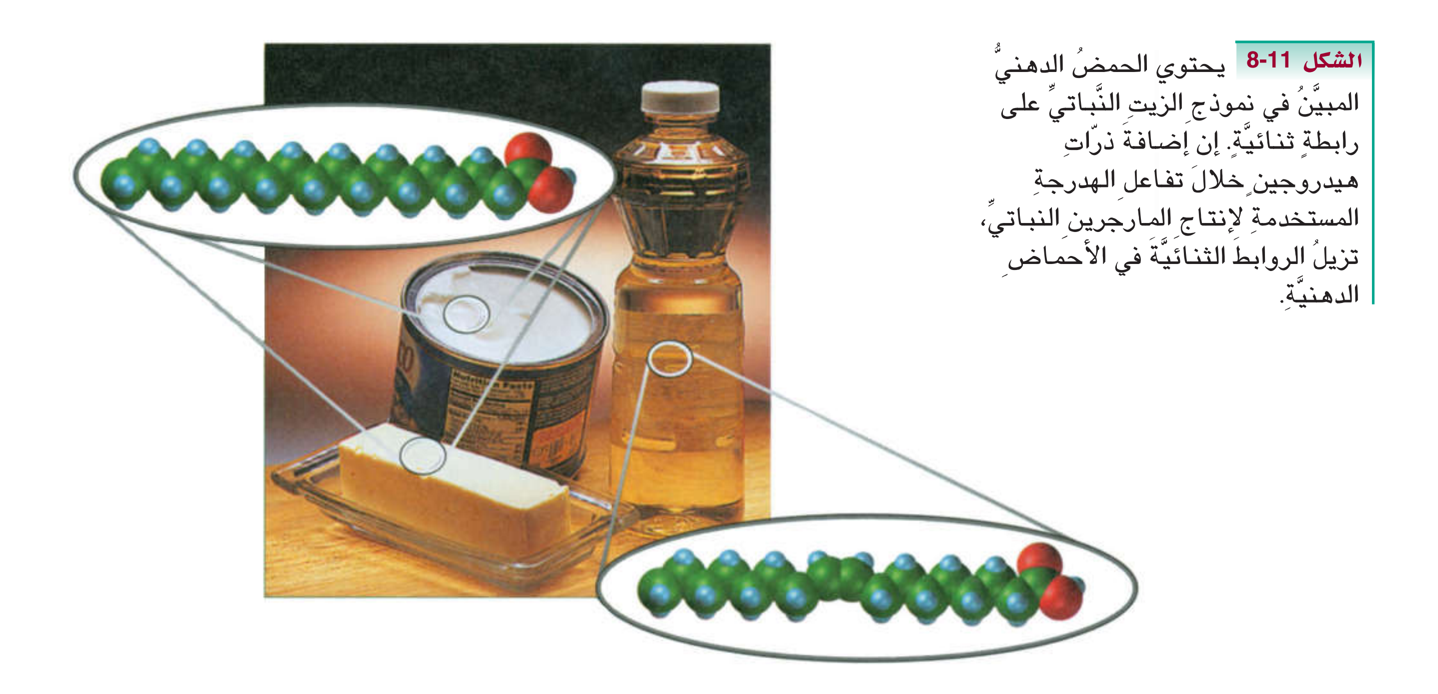
ويمكنُ أن تتكوَّنَ مركَّباتٌ إضافيَّةٌ نتيجةَ استبدالِ ذرّاتِ هيدروجينٍ أخرى في جزيءِ الميثانِ، والنواتجُ المتوقعَّةُ هي ثنائيّ كلورو ميثان، وثلاثيّ كلورو ميثان، ورباعيّ كلورو ميثان. يُعرفُ ثلاثيّ كلورو ميثان أيضًا بالكلوروفورم، ويُعرفُ رباعيّ كلورو ميثان برابعِ كلوريدِ الكربونِ. ومن الأمثلةِ الأخرى على تفاعلاتِ الاستبدالِ تكوينُ غازِ الفريون-11، والفريون-12 في التفاعلِ بين HF ورابعِ كلوريدِ الكربونِ.

$$Cl-\overset{Cl}{\underset{Cl}{C}}-Cl + H-F \xrightarrow{SbF_5} \underset{\text{فريون-11}}{Cl-\overset{Cl}{\underset{Cl}{C}}-F} + H-Cl$$

$$Cl-\overset{Cl}{\underset{Cl}{C}}-F + H-F \xrightarrow{SbF_5} \underset{\text{فريون-12}}{Cl-\overset{F}{\underset{Cl}{C}}-F} + H-Cl$$

تفاعلاتُ الإضافةِ

تفاعلُ الإضافةِ addition reaction ***هو ذلك التفاعلُ الذي تُضافُ فيه ذرَّةٌ أو جزيءٌ إلى جزيءٍ غيرِ مشبعٍ، مما يزيدُ من درجةِ تشبُّعِ ذلك الجزيءِ***. ومن الأمثلةِ الشائعةِ لتفاعلِ الإضافةِ ما يُعرفُ بتفاعلِ الهدرجةِ hydrogenation الذي تضافُ فيه ذرّاتُ هيدروجينٍ إلى جزيءٍ غيرِ مشبعٍ. فالزيوتُ النباتيَّةُ إستراتٌ ثلاثيَّةٌ لأحماضٍ دهنيَّةٍ غيرِ مشبعةٍ، وتتكوَّنُ الأحماضُ الدهنيَّةُ من سلاسلَ طويلةٍ من ذرّاتِ كربونٍ تحتوي على عدَّةِ روابطَ ثنائيَّةٍ. وتوضِّحُ المعادلةُ التاليةُ جزءًا من جزيءِ زيتٍ، عندما يمرَّرُ فيه غازُ الهيدروجينِ، حيثُ تضافُ ذرّاتُ الهيدروجينِ إلى الروابطِ الثنائيَّةِ في جزيءِ الزيتِ.



الشكل 8-11 يحتوي الحمضُ الدهنيُّ المبيَّنُ في نموذجِ الزيتِ النَّباتيِّ على رابطةٍ ثنائيَّةٍ. إن إضافةَ ذرّاتِ هيدروجين خلالَ تفاعلِ الهدرجةِ المستخدمةِ لإنتاجِ المارجرين النباتيِّ، تزيلُ الروابطَ الثنائيَّةَ في الأحماضِ الدهنيَّةِ.

$$\left(-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\text{C}}=\overset{\text{H}}{\text{C}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\text{C}}=\overset{\text{H}}{\text{C}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\right) + 2H_2 \xrightarrow{\text{حفّاز}} \left(-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{H}}{\text{C}}}-\right)$$

إن تحوُّلَ الروابطِ الثنائيَّةِ إلى روابطَ أحاديَّةٍ يغيِّرُ المادَّةَ من زيتٍ، سائل، إلى دهنٍ، صلبٍ. ويُقصدُ بـ «مهدرج»، الكلمةِ التي تردُ على علبةِ طعامٍ مُصنَّعٍ، أن الزيتَ فيه قد حوِّلَ إلى دهنٍ بهذه العمليَّةِ. وفي الشكلِ 8-11 عرضٌ لأمثلةٍ حولَ زيوتٍ ودهونٍ مهدرجةٍ.

تفاعلاتُ التكاثفِ

إن تفاعلَ التكاثفِ **condensation reaction** ***تفاعلٌ يتّحدُ فيه جزيئان، أو أجزاءٌ من الجزيءِ نفسِه معًا، بإزالةِ جزيءٍ صغير، كالماءِ.*** ومن الأمثلةِ على هذا التفاعلِ، التفاعلُ الذي يحدثُ بين الأحماضِ الأمينيَّةِ التي تحتوي على مجموعاتِ الأمينِ والكربوكسيل، فتتَّحدُ ذرَّةُ هيدروجينٍ من المجموعةِ الأمينيَّةِ في حمضٍ أمينيٍّ مع الهيدروكسيلِ في مجموعةِ كربوكسيلٍ في حمضٍ أمينيٍّ آخرَ، ليتكوَّنَ جزيءُ ماءٍ وثنائيُّ الببتيدِ. ولدى تكرارِ هذا التفاعلِ مرّاتٍ متعدِّدةً ينتجُ جزيءُ بروتينٍ.

$$\text{H}-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\overset{\text{H}}{\underset{R}{\text{C}}}-\overset{\text{O}}{\overset{\|}{\text{C}}}-\text{OH} + \text{H}-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\overset{\text{H}}{\underset{R'}{\text{C}}}-\overset{\text{O}}{\overset{\|}{\text{C}}}-\text{OH} \rightarrow \text{H}-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\overset{\text{H}}{\underset{R}{\text{C}}}-\overset{\text{O}}{\overset{\|}{\text{C}}}-\overset{\text{H}}{\text{N}}-\overset{\text{H}}{\underset{R'}{\text{C}}}-\overset{\text{O}}{\overset{\|}{\text{C}}}-\text{OH} + H_2O$$

حمضٌ أمينيٌّ — حمضٌ أمينيٌّ — ثنائيُّ ببتيدٍ — ماء

الشكل 11-9 يُزالُ الماءُ من السكَّروزِ عندَما يتفاعلُ مع حمضِ الكبريتيكِ المركَّزِ، وينتجُ كربونٌ.

تفاعلاتُ الحذفِ

إن تفاعلاتِ الحذفِ **elimination reaction** *هي التفاعلات التي يزالُ فيها جزيءٌ بسيطٌ، كالماءِ أو الأمونيا، من ذرّاتِ كربونٍ متجاورةٍ في جزيءٍ عضويٍّ.* ومن الأمثلةِ البسيطةِ على هذا النوعِ من التفاعلاتِ، تسخينُ الإيثانولِ بوجودِ حمضِ الكبريتيكِ المركَّزِ. وتحتَ هذه الظروفِ تُزالُ من جزيءِ الإيثانولِ ذرَّةُ هيدروجينٍ مرتبطةٌ بذرَّةِ كربونٍ، ومجموعةُ هيدروكسيلٍ مرتبطةٌ بذرَّةِ كربونٍ مجاورةٍ، و ينتجُ عن ذلك جزيءُ ماءٍ.

$$\mathrm{H{-}\underset{H}{\overset{H}{C}}{-}\underset{H}{\overset{OH}{C}}{-}H \xrightarrow[\Delta]{H_2SO_4} H{-}\underset{H}{C}{=}\underset{H}{C}{-}H + H_2O}$$

إيثانول   إيثين   ماء

وهناك مثالٌ آخرُ على تفاعلِ الحذفِ، هو عمليَّةُ إزالةِ الماءِ من السكَّروزِ عندَما يتفاعلُ مع حمضِ الكبريتيكِ المركَّزِ، وهو مبيَّنٌ في الشكلِ 11-9.

مراجعةُ القسم 11-3

1. علِّلْ ما يلي: – لا يحدثُ تفاعلُ إضافةٍ بين الكلورِ والإيثانِ.
   – تُعدُّ تفاعلاتُ الحذفِ عكسَ تفاعلاتِ الإضافةِ.
2. هل يزيدُ تفاعلُ الإضافةِ من تشبُّعِ جزيءٍ أم يقلِّلُ منهُ؟
3. ما المجموعاتُ الوظيفيَّةُ التي ينتجُ عنها جزيءُ ماءٍ في تفاعلِ تكاثفٍ بين حمضَينِ أمينيَّينِ؟

تفكيرٌ ناقد

4. **تطبيقُ نماذج:** اكتبْ تفاعلَ الاستبدالِ بينَ الإيثانِ والكلورِ. ما المركَّباتُ الإضافيَّةُ المحتملةُ نتيجةَ الاستبدالِ:
   أ. بذرَّتَيْ هيدروجينٍ في الجزيءِ؟
   ب. بثلاثِ ذرّاتِ هيدروجينٍ في الجزيءِ؟

القسم 4-11

مؤشّراتُ الأداءِ

- يفسِّرُ العلاقةَ بينَ المونومراتِ والبوليمراتِ.
- يفسِّرُ أثرَ اختلافِ البناءِ التركيبيِّ العامِّ للبوليمراتِ على خصائصِها.
- يحدِّدُ نوعَي البوليمرِ الرئيسيّنِ (الإضافةِ والتكاثفِ) وكيفيَّةَ الحصولِ عليهما.
- يربطُ بينَ التراكيبِ البنائيَّةِ للبوليمراتِ واستخداماتِها.

البوليمرات

أصبحَتِ البوليمراتُ تحيطُ بنا وتتواجدُ حولَنا فالطعامُ الذي نأكُلهُ، والملابسُ التي نرتديها مكوَّنةٌ من بوليمراتٍ. لعلَّ النشا والسليلوزَ والبروتيناتِ من أكثرِ البوليمراتِ الطبيعيَّةِ شيوعًا. وبعضُ البوليمراتِ الصناعيَّةِ المألوفةِ هي البلاستيكُ (اللدائن) والألياف الصناعيَّةُ.

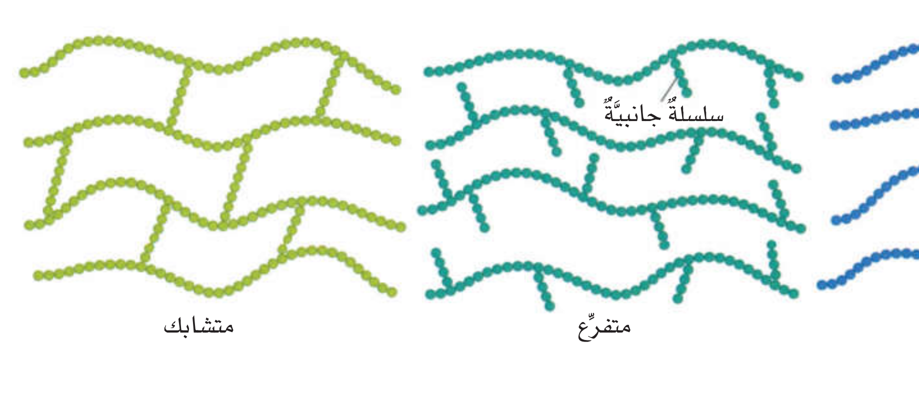
والبوليمراتُ **polymers** ***جزيئاتٌ ضخمةٌ مؤلَّفةٌ من عددٍ كبيرٍ من الوحداتِ الصغيرةِ تترابطُ خلالَ التفاعلاتِ العضويَّةِ. تسمَّى هذه الوحداتُ الصغيرةُ*** **مونومراتٍ monomers**.

البناءُ التركيبيُّ للبوليمراتِ وخصائصُها الحراريَّةُ

تُصنَّفُ البوليمراتُ وفقًا لسلوكِها عندَ تسخينِها إلى **بوليمراتٍ غيرِ ثابتةٍ حراريًا thermoplastic polymer** ***تنصهرُ عند تسخينِها، حيثُ يمكنُ إعادةُ تشكيلِها عدَّةَ مرَاتٍ.*** **والبوليمراتُ الثابتةُ حراريًا thermosetting polymer** ***لا تنصهرُ عندَ تسخينِها، بل تحافظُ على شكلِها الأصليِّ.*** ويمكنُ تفسيرُ الخصائصِ الحراريَّةِ للبوليمراتِ بحسبِ بنيتِها الخطّيَّةِ أو المتفرِّعةِ أو المتشابكةِ cross-linked، كما هو مبيَّنٌ في الشكل 11-10.

تكونُ الجزيئاتُ في البوليمرِ الخطّيِّ حرَّةَ الحركةِ فتنزلقُ بسهولةٍ أمامًا وخلفًا بعضُها فوقَ بعضٍ عند تسخينِها. هذا يعني أن البوليمراتِ الخطّيَّةَ غيرُ ثابتةٍ حراريًّا. وتحتوي جزيئاتُ البوليمرِ المتفرِّعِ على سلاسلَ جانبيَّةٍ تمنعُ الجزيئاتِ من الانزلاقِ بعضُها فوقَ بعضٍ بسهولةٍ. لكن يرجَّحُ أنها لا تزالُ غيرَ ثابتةٍ حراريًّا. وفي البوليمرِ المتشابكِ تكوِّنُ الجزيئاتُ المتجاورةُ في البوليمرِ روابطَ فيما بينها. فلا تتمكَّنُ الجزيئاتُ المنفردةُ أن ينزلقَ بعضُها فوقَ بعضٍ عندَ التسخينِ فتبقى البوليمراتُ المتشابكةُ في هذهِ الحالةِ محافظةً على شكلِها، وتكونُ بذلك بوليمراتٍ ثابتةً حراريًّا.

الشكل 11-10 قارنْ بينَ التراكيبِ البنائيَّةِ لثلاثةِ أنواعٍ من البوليمراتِ. عندَ التسخينِ تكونُ البوليمراتُ الخطّيَّةُ حرَّةَ الانزلاقِ، بينما تكونُ البوليمراتُ المتفرِّعةُ والمتشابكةُ محدودةَ الحركةِ أو معدومةَ الحركةِ.



بـوليـمراتُ الإضـافـةِ

إن بوليمرَ الإضافةِ **addition polymer** هو *البوليمرُ الذي يتكوَّنُ نتيجةَ تفاعل إضافةٍ بين المونومراتِ التي تحتوي على رابطةٍ ثنائيَّة.* مثلاً، تتبلمرُ جزيئاتُ الإيثين فيما بينها لتكوين البولي إيثين، الذي يُسمّى عادةً البولي إيثيلين:

$$nCH_2{=}CH_2 \xrightarrow{\text{حفاز}} \left(CH_2{-}CH_2 \right)_n$$

إيثين (إيثيلين) بولي إيثيلين

يبيِّنُ الحرفُ n أن تفاعلَ الإضافةِ يتكرَّرُ مرّاتٍ كثيرةً لتكوينِ بوليمرٍ طولُه n من المونومراتِ. ويمكنُ لهذا التفاعلِ أن يتكرَّر مئاتِ بل آلافِ المرّاتِ.

أشـكالُ البولي إيثيلين والبوليمراتِ ذاتِ الصلةِ

هناك أشكالٌ مختلفةٌ للبولي إيثيلين، كما يظهرُ في الشكل 11-11، ولها تراكيبُ جزيئيَّةٌ مختلفةٌ. فالبولي إيثيلين عالي الكثافةِ (HDPE) high-density polyethylene هو بوليمرٌ خطّيٌّ ذو كثافةٍ عاليةٍ، لأن الجزيئاتِ الخطّيَّةَ يمكنُ أن تتراصَّ بشكلٍ متقاربٍ جدًّا. أحدُ استخداماتِ HDPE، صنعُ الأوعيةِ البلاستيكيَّةِ كعبواتِ الحليبِ والعصيرِ، لأن البولي إيثيلين عاليَ الكثافةِ يبقى قويًّا وصلبًّا.

الشكل 11-11 تعكسُ خصائصُ الأشكالِ المختلفةِ للبولي إيثيلين في استخداماتِها. تستطيعُ الجزيئاتُ الخطّيَّةُ من البولي إيثيلين أن تتراصَّ متقاربةً، كما هو موضَّحٌ في نموذجِ البولي إيثيلين عالي الكثافةِ (HDPE). تمنعُ التفرُّعاتُ في البولي إيثيلينِ المتفرِّعِ الجزيئاتِ من التكدُّسِ بكثرةٍ كما هو موضَّحٌ في البناءِ التركيبيِّ للبولي إيثيلين قليل الكثافةِ (LDPE). أما الترابطاتُ المتداخلةُ للبولي إيثيلين التشابكيِّ (cPE)، فتجعلُ منه بوليمرًا قويًّا جدًّا.

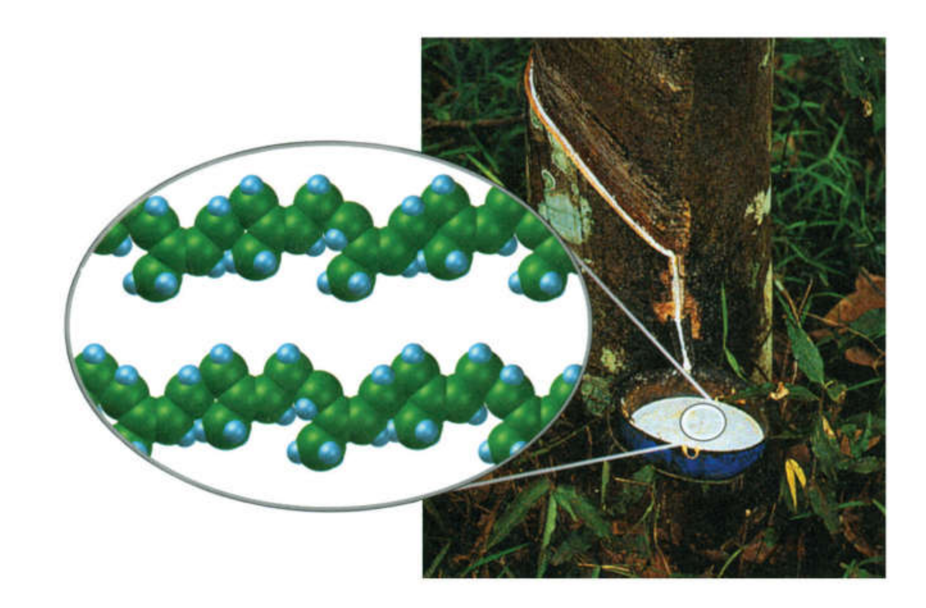
الجدول 11-8 بعضُ بوليمراتِ الإضافةِ

التركيبُ البنائيُّ للمونومر	اسمُ المونومرِ (الشائعُ)	اسمُ البوليمر	الاستخدام
$CH_2=CH-CH_3$	البروبيلين propylene	بولي البروبيلينِ polypropylene	العبواتُ البلاستيكيَّةُ
$CH_2=CH-Cl$	كلوريدُ الفينيلِ vinyl chloride	بولي كلوريدِ الفينيل polyvinyl chloride (PVC)	الأنابيبُ البلاستيكيَّةُ
$CH_2=CH-CN$	الأكريلونتريل acrylonitrile	بولي الأكريلونتريلِ polyacrylonitrile	الأقمشة
$CH_2=CH-C_6H_5$	الستايرين styrene	بولي الستايرينِ polystyrene	العزلُ الحراريُّ
$CH_2=CH-O-\overset{\overset{O}{\parallel}}{C}-CH_3$	ڤينيلُ الأسيتاتِ vinyl acetate	بولي ڤينيلِ الأسيتاتِ polyvinyl acetate	الموادُّ اللاصقةُ والأصباغُ

إذا سخِّنُ الإيثيلينُ إلى 200°C تحتَ ضغطٍ يزيدُ على 200 atm، قد يحصلُ تفرُّعٌ عشوائيٌّ في جزيئاتِ السلسلةِ خلالَ عمليَّةِ البلمرةِ. يحدثُ التفرُّعُ عندَ إزالةِ ذرّاتِ هيدروجينٍ من الجزيءِ، وإضافةِ جزيئاتِ إيثيلينٍ بدلاً منها في هذهِ المواقعِ. وعلى عكسِ الجزيئاتِ الخطّيَّةِ، لا تتمكَّنُ جزيئاتُ السلسلةِ المتفرِّعةِ من التجمُّعِ متقاربةً. لذلك، تكونُ كثافةُ سلسلةِ البولي إيثيلينِ المتفرِّعةِ أقلَّ من كثافةِ البولي إيثيلين الخطّيَّةِ. وتعرفُ السلسلةُ المتفرِّعةُ للبولي إيثيلينِ بالبولي إيثيلين منخفضِ الكثافةِ low-density polyethylene (LDPE). وتميلُ هذه المادَّةُ إلى أن تكونَ أقلَّ صلابةً من HDPE. وبذلك تستخدمُ في صنعِ الأكياسِ البلاستيكيَّةِ مثلاً.

لدى إزالةِ ذرّاتِ الهيدروجينِ من جزيئاتِ البولي إيثيلين، قد يترابطُ جزيئانِ متجاورانِ من السلسلةِ ويكوِّنانِ بذلك ارتباطًا متشابكًا بين جزيئيّيْنِ. والمعروفُ أن البولي إيثيلين التشابكيّ cross-linked polyethylene (يُسمّى أحيانًا cPE) يكونُ أكثرَ صلابةً وقوَّةً من HDPE، ويُستخدمُ للأشياءِ التي يُفترضُ أن تكونَ شديدَةَ الصلابةِ.

يمكنُ تحضيرُ بوليمراتِ إضافةٍ، مشابهةٍ للبولي إيثيلينِ، بأن تحلَّ محلَّ ذرَّةِ هيدروجينٍ في الإيثينِ، ذرَّةٌ أو مجموعةُ ذرّاتٍ، لتكوينِ المونومر. وفي الجدولِ 11-8 عددٌ من الأمثلةِ على بوليمراتِ الإضافةِ هذه.



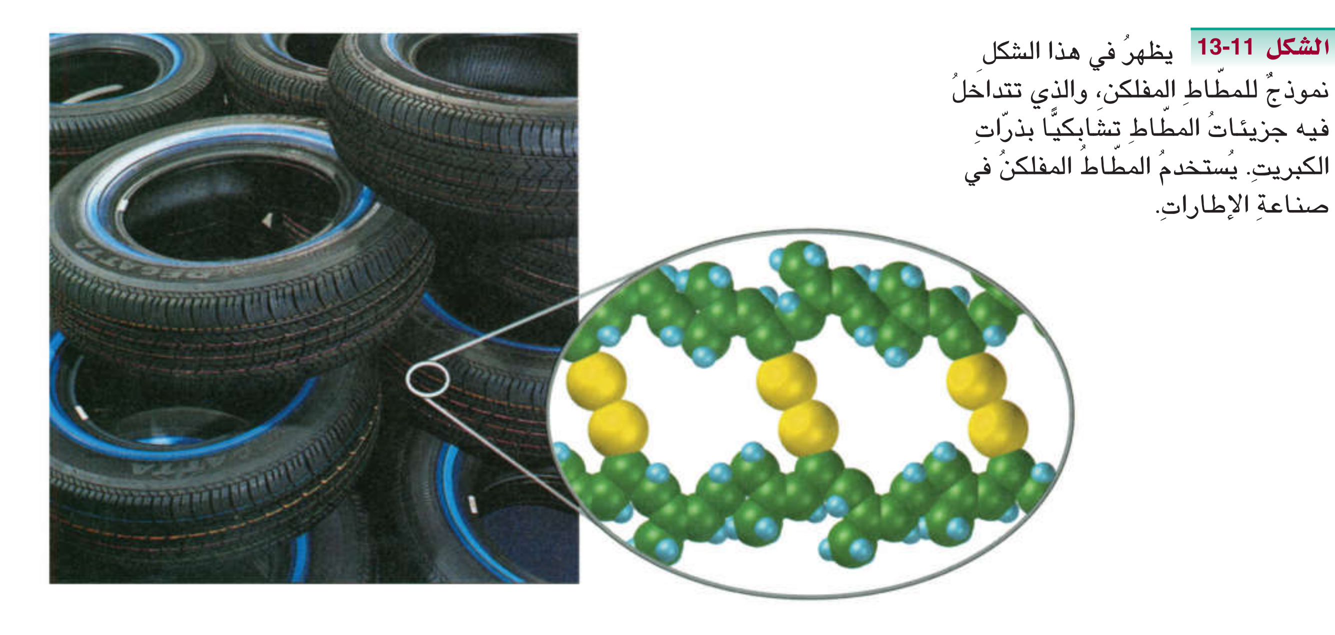
الشكل 11-12 تفرزُ شجرةُ المطّاطِ معلّقًا من المطّاطِ في الماءِ. ولدى ترسيبِ هذه الدقائقِ تتكوّنُ كتلةٌ لزجةٌ شبهُ صُلبةٍ. وفي الشكلِ نموذجٌ للمطّاطِ الطبيعيِّ.

المطّاطُ الطبيعيُّ والمطّاطُ الصناعيُّ

يستخلصُ المطّاطُ الطبيعيُّ من شجرةِ المطّاطِ، المُسمّاةِ Hevea brasiliensis، وهي تبدو في الشكلِ 11-12. يتكوّنُ المطّاطُ نتيجةَ تفاعلِ إضافةٍ. والمونومرُ في هذا التفاعلِ هو 2–ميثيل–1،3–بيوتاديين، المعروفُ بالأيزوبرينِ isoprene.

$$2n\ \underset{\text{أيزوبرين}}{H_2C{=}C(CH_3){-}CH{=}CH_2}\ \xrightarrow[\text{إضافة}]{\text{بلمرة}}\ \underset{\text{بولي أيزوبرين}}{\left(\!-CH_2-C(CH_3){=}CH-CH_2-CH_2-C(CH_3){=}CH-CH_2-\!\right)_n}$$

للمطّاطِ الطبيعيِّ تطبيقاتٌ قليلةٌ نسبيًّا. فلدى تسخينِه تنزلقُ جزيئاتٌ منفردةٌ من البولي أيزوبرينِ polyisoprene فيه بسهولةٍ إلى الأمامِ والخلفِ وبعضُها فوقَ بعضٍ. فيصبحُ المطّاطُ ناعمًا ولزجًا، ممّا يجعلُه عديمَ الفائدةِ للأغراضِ الصناعيَّةِ. ووجدَ أنّ إضافةَ الكبريتِ إلى المطّاطِ المنصهرِ أنتجَتْ مادّةً تبقى صلبةً وقويَّةً عندَما تبردُ. سمّيَتْ هذه العمليَّةُ بالفلكنةِ. **والفلكنةُ vulcanization** ***عمليَّةُ تداخلٍ بين جزيئاتِ البولي أيزوبرينِ polyisoprene المتجاورةِ التي تحدثُ لدى تسخينِ الجزيئاتِ مع ذرّاتِ الكبريتِ.*** ويمكنُ ملاحظةُ ذلك في النموذجِ في الشكلِ 11-13. وبذلكَ تعملُ الفلكنةُ على جعلِ المطّاطِ قابلاً للاستخدامِ في مجالٍ واسعٍ من المنتجاتِ، كصناعاتِ الأنابيبِ المطّاطيَّةِ والملابسِ الواقيةِ من المطرِ وإطاراتِ السيارّاتِ....



الشكل 11-13 يظهرُ في هذا الشكلِ نموذجٌ للمطّاطِ المفلكن، والذي تتداخلُ فيه جزيئاتُ المطّاطِ تشابكيًّا بذرّاتِ الكبريتِ. يُستخدمُ المطّاطُ المفلكنُ في صناعةِ الإطارات.

ومن الأمثلةِ على المطّاطِ الصناعيِّ النيوبرين neoprene الذي يتكوَّنُ خلالَ بلمرةِ 2–كلوروبيوتادين. لاحظْ أن 2–كلوروبيوتادين يشبهُ الأيزوبرينَ isoprene، مونومرَ المطّاطِ الطبيعيِّ، باستثناءِ إحلالِ ذرَّةِ كلورٍ محلَّ مجموعةِ ميثيلٍ في ذرَّةِ الكربونِ رقم 2.

$$\mathrm{H_2C=C(CH_3)-CH=CH_2}$$

أيزوبرين
isoprene

$$\mathrm{H_2C=C(Cl)-CH=CH_2}$$

2–كلورو بيوتادين
2-chlorobutadiene

بوليمراتُ التكاثفِ

تتكوَّنُ بوليمراتُ التكاثفِ* condensation polymers *من خلالِ تفاعلاتِ التكاثفِ. ولا بُد أن تحتويَ مونومراتُ بوليمراتِ التكاثفِ على مجموعتيْنِ وظيفيَّتيْنِ، ممّا يجعلُ كلَّ مونومرٍ منها يرتبطُ بمونومرَيْنِ آخرَيْنِ لدى تفاعلاتِ التكاثفِ.

البولي أميداتُ والنايلونُ

من الأمثلةِ على بوليمراتِ التكاثفِ، تفاعلُ كلٍّ من الحمضِ الكربوكسيليِّ المحتوي على مجموعتَيْ كربوكسيلٍ (حمضِ الأديبيك) مع أمينٍ يحتوي على مجموعتَي أمين (ثنائي أمينو هكسان).

$$nH-\overset{\overset{\large H}{|}}{N}-(CH_2)_6-\overset{\overset{\large H}{|}}{N}-H + nHO-\overset{\overset{\large O}{||}}{C}-(CH_2)_4-\overset{\overset{\large O}{||}}{C}-OH \rightarrow$$

ثنائيّ أمينو هكسان — حمضُ الأديبيكِ

$$-\!\!\left(\overset{\overset{\large H}{|}}{N}-(CH_2)_6-\overset{\overset{\large H}{|}}{N}-\overset{\overset{\large O}{||}}{C}-(CH_2)_4-\overset{\overset{\large O}{||}}{C}\right)_n + nH_2O$$

نايلون 66 — ماء

الشكل 11-14 يظهرُ النايلونُ 66 هنا وهو يُلفُّ حولَ الساقِ الزجاجيَّة. ينتجُ النايلونُ من خلالِ بلمرةِ حمضِ الأديبيكِ (الطبقةِ العليا) وثنائيّ أمينو هكسان (الطبقةِ السفلى).

ويظهرُ هذا التفاعلُ في الشكلِ 11-14. حيثُ يحتوي الناتجُ على نوعَيْنِ من المونومرات، هما: مونومرُ حمضِ الأديبيكِ، ومونومرُ ثنائيّ أمينو هكسان. يُسمّى هذا البوليمرُ نايلون 66، لاحتواءِ كلِّ مونومرٍ منه على ستِّ ذرّاتِ كربونٍ. ويعدُّ هذا البوليمرُ من أكثرِ البوليمراتِ المصنَّعةِ استخدامًا.

النايلونُ 66 مثالٌ على بوليمرِ البولي أميد polyamide. وقد اشتقَّتْ عبارةُ البولي أميدِ من وجودِ مجموعةِ الأميدِ في البوليمرِ. فيما يلي صيغةُ مجموعةِ الأميدِ.

$$-\overset{\overset{\large O}{||}}{C}-\overset{\overset{\large H}{|}}{N}-$$

لاقَتِ البولي أميداتُ نجاحاتٍ تجاريَّةً لإمكانيَّةِ نسجها بأشكالٍ مختلفةٍ. فبالإمكانِ غزلُها وحياكتُها، كالألياف الطبيعيَّة لصنعِ الجواربِ وبقيَّةِ أنواعِ الألبسةِ. ولدى معاملةِ البولي أميداتِ بالإشعاعِ، تحدثُ تداخلاتٌ متعدِّدةٌ، ويصبحُ المنتجُ النهائيُّ صلبًا جدًّا وقويًّا. ويصنعُ الكفلار Kevlar بهذهِ الطريقةِ، وهو منتجٌ قويٌّ يُستخدمُ في تصنيعِ السترات الواقيةِ من الرصاصِ التي يرتديها العسكريّون ورجالُ الأمنِ.

مراجعةُ القسم 11-4

1. علِّلْ ما يلي:

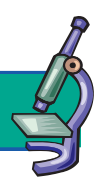
- تُصنعُ مقابضُ أدواتِ الطهوِ من بوليمرٍ ثابتٍ حراريًّا.
- لا يمكنُ الحصولُ على بوليمرِ إضافةٍ مُصنَّعٍ من مونومرٍ له روابطُ أحاديَّةٌ فقط.
- لا يخضعُ جزيءٌ ذو مجموعةٍ وظيفيَّةٍ واحدةٍ لتفاعُلِ تكاثفٍ لتكوينِ بوليمر.

تفكيرٌ ناقد

2. تطبيقُ نماذج: بولي كلوريد الفينيل (PVC) بوليمرٌ يُستخدمُ في الأنابيبِ والأرضيّاتِ البلاستيكيَّةِ. الـ PVC بوليمرُ إضافةٍ يصنعُ من الكلورو إيثين المعروفِ بكلوريدِ الفينيلِ.

أ. ارسمِ التركيبَ البنائيَّ لكلوريدِ الفينيلِ.

ب. اكتبْ تفاعلَ البلمرةِ لكلوريدِ الفينيلِ، لتكوينِ البولي كلوريدِ الفينيلِ.



قراءةٌ علميّةٌ

البلاستيكُ الشديدُ العزلِ

صودا بلا طعم وتكنولوجيا منقذة. مهما تكنْ درجةُ تثبيتِ الغطاءِ على فوّهةِ القنّينةِ، فإن الصودا تفقدُ فورانَها وتصبحُ بلا طعمٍ مع مرورِ الزمنِ. يتسرَّبُ الغازُ من القنّينةِ بسببِ طبيعةِ البلاستيكِ. تمَّ اختراعُ نوعٍ خاصٍّ من البلاستيكِ سُمّيَ بوليمرَ البلورِ السائلِ.

فهذه الجزيئاتُ الطويلةُ المكوِّنةُ للبلاستيكِ لا تتماسكُ بقوّةٍ، وهي بدلاً عن ذلك تتحرَّكُ باستمرارٍ فتفتحُ ثغراتٍ بينها يتسرَّبُ منها الغازُ. وفي قناني الصودا، يذوبُ ثاني أكسيدِ الكربونِ الموجودِ في المشروبِ الغازيِّ في البلاستيكِ فيتسرَّبُ إلى الهواءِ خارجَ القنّينةِ. وبالعكس، تسمحُ الحاوياتُ البلاستيكيَّةُ للأكسجينِ بأن يعبُرَ من الخارجِ إلى الداخلِ، وهكذا يتلفُ الطعامُ الذي تحتويه.

لذلك تصنعُ بوليمراتُ البلّورِ السائلِ أو LCPs من جزيئاتٍ طويلةٍ، وهي شبيهةٌ ببقيَّةِ أنواعِ البلاستيكِ. لكنَّ جزيئاتِها أكثرُ استقامةٍ وجميعُها يؤشّرُ باتّجاهٍ واحدٍ. ولصعوبةِ مرورِ جزيئاتِ الغازِ من خلالِها، تكونُ مادةُ LCPs بذلك نموذجيَّةً لتصنيعِ الحاوياتِ. فبالإضافةِ إلى قدرتِها على إبقاءِ المشروباتِ الغازيَّةِ طازجةً تتمكَّنُ بصفتِها من البلاستيكِ الشديدِ العزلِ أن تحلَّ محلَّ الزجاجِ في تعبئةِ الطعامِ وخزنِهِ وتجنيبِه ما يتعرَّضُ له من تلفٍ نتيجةَ تعرُّضِه للأكسجينِ. ويمتازُ هذا النوعُ من البلاستيكِ أيضًا بخفَّةِ الوزنِ وعدمِ قابليَّتِه للكسرِ. كذلك تتميَّزُ حاوياتُ الغازِ المصنوعةُ من LCPs بقدرتِها على منعِ تسرُّبِ الأبخرةِ التي تلوِّثُ المحيطَ والبيئةَ. كما تُستخدمُ بوليمراتُ البلَّورِ السائلِ كمادَّةٍ حافظةٍ في تغليفِ أسلاكِ الكهرباءِ تحتَ الأرضِ، لجعلِها غيرَ منفذةٍ للماءِ، وبالتالي خاليةً من الصدأ. وتستخدمُ LCPs حاليًّا في تصنيعِ أنابيبِ التنفُّسِ في ملابسِ روّادِ الفضاءِ.

طبقةُ LCP (البيضاءُ) لهذا الكابلِ تجعلُهُ غيرَ منفذٍ للماءِ.

لم يعمَّمِ استخدامُ بوليمراتِ البلَّورِ السائلِ حاليًّا في تغليفِ المنتجاتِ اليوميَّةِ، وذلك لارتفاعِ كلفتِها عن كلفةِ البلاستيكِ العاديِّ. من ناحيةٍ أُخرى، تمَّ اقتراحُ حلٍّ لهذه المشكلةِ بتصنيعِ ما سمّيَ بالتركيبِ المؤلَّفِ composite structure، وهو خليطٌ من البلاستيكِ العاديِّ وبوليمرِ البلَّورِ السائلِ، وذلك لحشوِ طبقةٍ رقيقةٍ من LCP بين طبقتَيْنِ من البلاستيكِ العاديِّ. تمكِّنُ هذهِ الطريقةُ المصنِّعَ من خفضِ الكلفةِ مع الاحتفاظِ بالصودا فوارّةً، دونَ أن تفقدَ غازَها. وهكذا نرى أننا في بدايةِ الفهمِ الحقيقيِّ لبناءِ تراكيبَ كيميائيَّةٍ خاصَّةٍ والسيطرةِ على خصائصِها، ولايزالُ بابُ البحثِ مفتوحًا لمزيدٍ من التحسيناتِ بخصوصِ هذه الموادّ.

أسئلة

1. صفْ كيفَ يساهمُ البناءُ التركيبيُّ لـ LCPs في خصائصِها المميّزةِ.
2. ما الحلُّ المقترحُ لتخفيضِ كلفةِ الموادِّ المصنَّعَةِ من LCPs؟

مراجعةُ الفصل 11

ملخّصُ الفصل

1-11

- المجموعةُ الوظيفيَّةُ ذرَّةٌ أو مجموعةُ ذرّاتٍ تحدِّدُ خصائصَ المركَّباتِ العضويَّةِ التي تحتوي عليها.
- تحدِّدُ أسماءُ المركَّباتِ العضويَّةِ نوعَ المجموعاتِ الوظيفيَّةِ الموجودةِ وموقعَها.
- تحتوي الكحولاتُ على مجموعةِ هيدروكسيل وظيفيَّةٍ. يؤثِّرُ ميلُ الكحولاتِ إلى تكوينِ روابطَ هيدروجينيَّةٍ في خصائصِها وطبيعةِ استخداماتِها.
- في هاليداتِ الألكيلِ تحلُّ ذرَّةُ هالوجينٍ واحدةٌ أو أكثرُ محلَّ ذرَّةِ هيدروجين أو أكثر في الألكان. لأحدِ أصنافِ هاليداتِ الألكيل، CFCs عددٌ من الاستخداماتِ الصناعيَّةِ. لكن يمكنُه أن يسبِّبَ مشكلاتٍ بيئيَّةً خطيرةً.
- ترتبطُ مجموعتا ألكيل بذرَّةِ أكسجين في جزيءِ الإيثر. ومع أن الإيثراتِ غيرُ نشطةٍ عمومًا، فإنها واسعةُ الاستخدامِ كمذيباتٍ.
- تعكسُ الخصائصُ الفيزيائيَّةُ والكيميائيَّةُ للأصنافِ العضويَّةِ قدرةَ الجزيئاتِ في كلِّ صنفٍ على تكوينِ روابطَ هيدروجينيَّةٍ، أو عدمَ قدرتِها على ذلك.

المفردات

المجموعةُ الوظيفيَّةُ functional group (295)
الكحولات alcohols (295)
هاليداتُ الألكيلِ alkyl halides (298)
الإيثرات ethers (301)

2-11

- تحتوي كلٌّ من الألدهيداتِ والكيتوناتِ على مجموعةِ الكربونيلِ المسؤولةِ عن بعضِ النكهاتِ. ترتبطُ مجموعةُ الكربونيل في الألدهيداتِ بذرَّةِ كربونٍ طرفيَّةٍ في سلسلةِ الكربونِ. ويكونُ ارتباطُها في الكيتوناتِ، غير طرفيٍّ.
- تحتوي الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ على مجموعاتِ كربوكسيلٍ. وتكونُ هذه الأحماضُ ضعيفةً في المحاليلِ المائيَّةِ.
- في الإستراتِ تحلُّ مجموعةُ ألكيلٍ محلَّ ذرَّةِ هيدروجينٍ في مجموعةِ الكربوكسيل. وتعطي الإستراتُ الطبيعيَّةُ أو المصنَّعةُ لعددٍ من الأطعمةِ نكهاتِها.
- الأميناتُ مشتقّاتٌ للأمونيا حلَّتْ فيها مجموعةُ ألكيلٍ واحدةٌ أو أكثرُ محلَّ ذرَّةٍ أو أكثرَ من الهيدروجين. وتسلكُ الأميناتُ كقواعدَ ضعيفةٍ في المحاليلِ المائيَّةِ.

المفردات

الألدهيدات aldehydes (304)
الكيتونات ketones (304)
الأحماضُ الكربوكسيليَّةُ carboxylic acids (306)
الإسترات esters (307)
الأمينات amines (309)
الأمينُ الأوَّليُّ primary amine (309)
الأمينُ الثانويُّ secondary amine (309)
الأمينُ الثالثيُّ tertiary amine (309)

3-11

- يضيفُ كلٌّ من تفاعلِ الإضافةِ والاستبدالِ ذرّاتٍ إلى الجزيءِ. وفي تفاعلِ الاستبدالِ، تستبدلُ ذرَّةٌ أو مجموعةٌ من الذرّاتِ. وتضافُ في تفاعلِ الإضافةِ ذرَّةٌ أو مجموعةُ ذرّاتٍ إلى رابطةٍ ثنائيَّةٍ أو ثلاثيَّةٍ.
- يحذفُ جزيءٌ صغيرٌ عادةً خلالَ كلٍّ من تفاعلَي التكاثفِ والحذفِ.

المفردات

تفاعلُ الاستبدالِ substitution reaction (313)
تفاعلُ الإضافةِ addition reaction (313)
تفاعلُ التكاثفِ condensation reaction (314)
تفاعلُ الحذفِ elimination reaction (315)

4-11

- البوليمراتُ جزيئاتٌ ضخمةٌ مكوَّنةٌ من عددٍ من الوحداتِ المكرَّرةِ تُسمّى المونومرات.
- البوليمراتُ الثابتةُ حراريًّا لا تنصهرُ بعد تكوُّنِها، والبوليمراتُ غيرُ الثابتةِ حراريًّا تنصهرُ أكثرَ من مرَّةٍ.
- تتأثَّرُ الخصائصُ الفيزيائيَّةُ للبوليمراتِ تأثُّرًا بالغًا بوجودِ أو عدمِ وجودِ التفرُّعِ أو الارتباطِ التشابكيِّ بينَ سلاسلِ البوليمر.
- تفاعلاتُ الإضافةِ يلزمُها أن تحتويَ المونومراتُ المكوِّنةُ لها على رابطةٍ ثنائيَّةٍ. وينتجُ البولي إيثيلين والبوليمراتُ ذاتُ العلاقةِ، والمطّاطُ الطبيعيُّ والصناعيُّ، عن بلمرةِ إضافةٍ.
- لا بُدَّ أن تحتويَ مونومراتُ بوليمراتِ التكاثفِ على مجموعتيْنِ وظيفيتيْنِ. النايلونُ 66، وبقيَّةُ البولي أميداتِ، هي بوليمراتُ تكاثفٍ.

المفردات

البوليمرات polymers (316)	البوليمرُ الثابتُ حراريًّا thermosetting polymer (316)	بوليمرُ التكاثفِ condensation polymer (320)
المونومرات monomers (316)	بوليمرُ الإضافةِ addition polymer (317)	
البوليمرُ غيرُ الثابتِ حراريًّا thermoplastic polymer (316)	الفلكنة vulcanization (319)	

اختيارٌ من متعدِّدٍ

1. خلالَ تفاعلِ بلمرةِ التكاثفِ

أ. يصبحُ الناتجُ مشبعًا.

ب. يتكوَّنُ في الغالبِ ماءٌ.

ج. يتكوَّنُ كحولٌ.

د. تتحوَّلُ مجموعةُ ألدهيدٍ إلى مجموعةِ كيتونٍ.

2. عند تسميةِ مركَّبٍ عضويٍّ فإن

أ. تحديدَ مواقعِ المجموعاتِ الوظيفيّةِ كافَّةً يكونُ اختياريًّا.

ب. عددَ ذرّاتِ الكربونِ في الجزيءِ لا يكونُ له أهميَّةٌ.

ج. أولى الخطواتِ هي تحديدُ أطولِ سلسلةٍ هيدروكربونيَّةٍ، ثمَّ تسميتُها.

د. السلاسلَ الجانبيَّةَ تُهملُ عندما نسمّي الجزيءَ.

3. المركَّباتُ العضويَّةُ التي تختلفُ فقط في ترتيبِ الذرّاتِ المترابطةِ، تُسمّى

أ. بوليمراتِ تكاثفٍ.

ب. بوليمراتِ إضافةٍ.

ج. أيزومراتٍ بنائيَّةً.

د. أيزومراتٍ هندسيَّةً.

4. المجموعاتُ الوظيفيَّةُ العضويَّةُ

أ. تعطي المركَّباتِ التي تحتوي عليها خصائصَ مميّزةً.

ب. تحتوي دائمًا على الأكسجين.

ج. تحتوي دائمًا على رابطةٍ ثنائيَّةٍ أو ثلاثيَّةٍ.

د. توجدُ في كلِّ مركَّبٍ عضويٍّ.

5. المركَّباتُ العضويَّةُ التي تحتوي على $-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-$ من الممكن أن تكونَ

أ. ألدهيداتٍ أو كيتوناتٍ.

ب. أحماضًا كربوكسيليَّةً.

ج. إستراتٍ.

د. جميعَ ما ذُكرَ سابقًا.

6. أيُّ المركَّباتِ التاليةِ تحتوي على مجموعتَي ألكيلٍ مرتبطتيْنِ مباشرةً مع ذرَّةِ أكسجينٍ؟

أ. الإستراتُ

ب. الكيتوناتُ

ج. الكحولاتُ

د. الإيثراتُ

7. أيُّ من التفاعلاتِ التاليَّةِ تفاعلُ استبدالٍ؟

أ. $CH_2{=}CH_2 + Cl_2 \rightarrow Cl{-}CH_2{-}CH_2{-}Cl$

ب. $CH_3{-}CH_2{-}CH_3 + Cl_2 \rightarrow Cl{-}CH_2{-}CH_2{-}CH_3 + HCl$

ج. $CH_3{-}OH + CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}OH \rightarrow CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}CH_3 + H_2O$

د. $CH_3{-}\underset{OH}{\underset{|}{CH}}{-}CH_3 \xrightarrow[\Delta]{H_2SO_4} CH_3{-}CH{=}CH_2 + H_2O$

مراجعةُ الفصل 11

8. أيٌّ من التفاعلاتِ التاليةِ تفاعلُ إضافةٍ؟

أ. $CH_3{-}CH_2{-}CH{=}CH_2 + Br_2 \rightarrow CH_3{-}CH_2{-}CH(Br){-}CH_2{-}Br$

ب. (حلقي هكسانول) $\xrightarrow[\text{حرارة}]{85\%\ H_3PO_4}$ (حلقي هكسين) $+ H_2O$

ج. $CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}OH + CH_3{-}OH \rightarrow CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}O{-}O{-}CH_3 + H_2O$

د. (حلقي هكسان) $+ Cl_2 \rightarrow$ (كلورو حلقي هكسان) $+ HCl$

9. أيٌّ من التفاعلاتِ التاليةِ تفاعلُ تكاثفٍ؟

أ. $CH_3{-}C{\equiv}CH + HBr \xrightarrow{\text{الإيثر}} CH_3{-}\overset{Br}{\overset{|}{C}}{=}CH_2$

ب. (حلقي هكسين) $+ Br_2 \xrightarrow{CCl_4}$ (ثنائي برومو حلقي هكسان)

ج. $CH_3{-}CH_2{-}OH + CH_3{-}CH_2{-}OH \xrightarrow{H_2SO_4} CH_3{-}CH_2{-}O{-}CH_2{-}CH_3 + H_2O$

د. $CH_3{-}\overset{OH}{\overset{|}{C}}(CH_3){-}CH_3 \xrightarrow{H_2SO_4} CH_2{=}C(CH_3)_2$

10. أيٌّ من التفاعلاتِ التاليةِ تفاعلُ حذفٍ؟

أ. $CH_2{=}CH{-}CH_2{-}CH_3 + Cl_2 \longrightarrow Cl{-}CH_2{-}CH(Cl){-}CH_2{-}CH_3$

ب. $CH_3{-}\overset{OH}{\overset{|}{CH}}{-}CH_3 \xrightarrow{H_3O^+} CH_3{-}CH{=}CH_2 + H_2O$

ج. $CH_3CH_3 + Cl_2 \xrightarrow[\text{أو حرارة}]{\text{ضوء}} CH_3CH_2Cl + HCl$

د. $CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}OH + NH_2{-}CH_3 \rightarrow CH_3{-}\overset{O}{\overset{\|}{C}}{-}NH{-}CH_3 + H_2O$

مراجعةُ المفاهيم

11. ما المقصودُ بكلٍّ من:
الكحولاتِ، الإيثراتِ، هاليداتِ الألكيلِ، الألدهيداتِ، الإستراتِ، الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ، المونومراتِ، بوليمراتِ الإضافةِ، بوليمراتِ التكاثفِ؟

12. اكتبِ الصيغةَ العامَّةَ لكلٍّ ممّا يأتي:

أ. الكحول
ب. الإيثر
ج. هاليدِ الألكيلِ
د. الألدهيد
هـ. الإستر
و. الكيتون
ز. الأمين

13. علِّلْ ما يلي:

أ. ارتفاعَ درجةِ غليانِ الماءِ عن الميثانولِ.
ب. استخدامَ الجليسيرولِ في صناعةِ المراهمِ المرطِّبةِ للجلدِ.
ج. تحمُّلَ المطّاطِ المفلكنِ درجاتِ حرارةٍ أعلى من المطّاطِ الصناعيِّ.
د. سلوكَ الأميناتِ سلوكًا قاعديًا.
هـ. انخفاضَ درجةِ غليانِ الإيثراتِ، بالرغمِ من ذوبانيَّتِها العاليةِ في الماءِ.
و. زيادةَ سمِّيَّةِ الميثانولِ عشرَ مرّاتٍ عن الإيثانولِ.
ز. ارتفاعَ درجةِ غليانِ الكحولاتِ بزيادةِ عدد مجموعاتِ الهيدروكسيلِ في جزيئاتِها.
ح. الانتشارَ الواسعَ للإيثراتِ كمذيباتٍ.
ط. تصنيفَ الألدهيداتِ والكيتوناتِ في نوعَيْنِ مختلفَيْنِ من المركَّباتِ العضويَّةِ، رغمَ احتواءِ كلٍّ منهما على مجموعةِ الكربونيلِ.

14. ماذا يترتَّبُ من إيجابيّاتٍ وسلبيّاتٍ على استخدامِ الجازوهولِ كوقودٍ للمحروقاتِ.

15. لماذا يعتبرُ CFCs مهدِّدًا للبيئةِ.

16. الكحولاتُ والإيثراتُ مركَّباتٌ عضويَّةٌ تحتوي على أكسجينٍ. وضِّحِ الاختلافَ بينَ تركيبَيْهِما الكيميائيَّيْنِ.

17. أ. بيِّنِ التفاعلَ الذي يحدثُ عندَ ذوبانِ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ في الماءِ.
ب. ما خاصّيَّةُ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ التي يبيِّنُها هذا التفاعلُ؟

18. ما العلاقةُ بين الإستراتِ والأحماضِ الكربوكسيليَّةِ؟

19. ما العناصرُ التي تتضمَّنُها الأميناتُ، بالإضافةِ إلى الكربونِ والهيدروجينِ؟

20. بيِّنِ التفاعلَ الذي يحدثُ لدى مزجِ الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ مع الأميناتِ.

21. سمِّ خمسةَ أصنافٍ من المركَّباتِ العضويَّةِ تكونُ في الغالبِ مسؤولةً عن النكهاتِ والروائحِ.

22. ما أصنافُ المركَّباتِ العضويَّةِ التي تحتوي على أكسجينٍ؟

23. ما نوعُ التفاعلِ الكيميائيِّ الذي تتوقَّعُ حدوثَه بينَ 2-أوكتين وبروميد الهيدروجين، HBr؟

24. كم جزيئًا من الكلورِ، Cl_2، يمكنُ إضافتُه إلى جزيءٍ من 1-بروبين؟ وإلى جزيءٍ من 1-بروباين؟

25. قارنْ بينَ تفاعلِ الاستبدالِ وتفاعلِ الإضافةِ.

26. ما المشكلاتُ التي تتوقَّعُ أن تعترضَكَ عند محاولةِ هدرجةِ الهكسان، C_6H_{14}؟

27. في تفاعلٍ كيميائيٍّ، ارتبطَ جزيئانِ صغيران، ونتجَ جزيءُ ماءٍ. ما نوعُ التفاعلِ الذي حدثَ؟

28. هل يزيدُ تفاعلُ الإضافةِ من تشبُّعِ جزيءٍ أو يقلِّلُ منهُ؟

29. سمِّ ثلاثةَ مُنتجاتٍ طبيعيَّةٍ شائعةٍ، وثلاثةَ مُنتجاتٍ صناعيَّةٍ مصنوعةٍ من البوليمراتِ.

30. ما التفاعلانِ اللذانِ يمكنُ أن يُنتجا بوليمراتٍ؟

31. بيِّنِ الفروقَ في التركيباتِ البنائيَّةِ بين الأنواعِ الثلاثةِ للبولي إيثيلين: HDPE، LDPE، cPE.

32. فيمَ يختلفُ التركيبُ الجزيئيُّ للنيوبرينِ neoprene عن التركيبِ الجزيئيِّ للمطّاطِ الطبيعيِّ؟

33. هل يمكنُ أن يُستخدمَ حمضُ الإيثانويك كمونومرٍ في بوليمرِ تكاثفٍ؟ برِّرْ إجابتَك.

34. ارسمِ الصيغةَ البنائيَّةَ لمجموعةِ الأميد.

مسائل

تسميةُ المركَّباتِ العضويَّةِ

35. سمِّ الكحولاتِ التاليةَ:

أ. CH_3-OH

ب.
OH
$CH_3-CH-CH_2-OH$

ج.
OH
$CH_3-CH-CH_2-CH_3$

د.
OH
$CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH-CH_3$

36. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من أنواعِ الكحولاتِ التاليةِ:

أ. 3،2-بنتاديول

ب. 1-بنتانول

ج. 3،2،1-بروبانتريول

د. إيثانول

37. سمِّ هاليداتِ الألكيلِ التاليةَ: (راجعِ المسألةَ النموذجيَّةَ 1-11)

أ. CH_3-I

ب. $Cl-CH_2-CH_2-Cl$

ج.
I Br
$CH_3-C-C-CH_3$
I Br

د.
Br
CH_3-CH_2-C-Br
Br

38. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من هاليداتِ الألكيلِ التاليةِ:

أ. 4،3،2-ثلاثيّ كلورو بنتان

ب. 1،1-ثنائيّ يودو بروبان

ج. 1-فلورو هكسان

د. 2،2-ثنائيّ كلورو-1،1-ثنائيّ فلورو بروبان

39. سمِّ الإيثراتِ التاليةَ: (راجعِ المسألةَ النموذجيَّةَ 2-11)

أ. $CH_3-CH_2-CH_2-O-CH_2-CH_2-CH_3$

ب. $CH_3-O-CH_2-CH_3$

ج. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$

د. $CH_3-CH_2-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$

40. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الإيثراتِ التاليةِ:

أ. ثنائيّ ميثيل إيثر

ب. ميثيل بروبيل إيثر

ج. بيوتيل بروبيل إيثر

د. إيثيل هبتيل إيثر

41. سمِّ الألدهيداتِ التالية:

أ. $CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-H$

ب. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-H$

ج. $CH_3-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-H$

د. $CH_3-CH_2-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-H$

42. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الألدهيداتِ التاليةِ:

أ. ميثانال

ب. هكسانال

ج. أوكتانال

د. إيثانال

43. سمِّ الكيتوناتِ التاليةَ:

أ. $CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_3$

ب. $CH_3-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_3$

ج. $CH_3-CH_2-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_3$

د. $CH_3-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-CH_2-CH_3$

44. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الكيتوناتِ التاليّةِ:

أ. 3–هكسانون

ب. 2–بنتانون

ج. 2–أوكتانون

د. 2–هكسانون

45. سمِّ الأحماضَ الكربوكسيليَّةَ التاليةَ:

أ. $CH_3-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-OH$

ب. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-OH$

ج. $H-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-OH$

46. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الأحماضِ الكربوكسيليَّةِ التاليةِ:

أ. حمضِ البيوتانويكِ

ب. حمضِ الهكسانويكِ

ج. حمضِ الهبتانويكِ

47. سمِّ الإستراتِ التاليةَ:

أ. $CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-CH_3$

ب. $H-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-CH_3$

ج. $CH_3-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-CH_2-CH_3$

د. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-CH_2-CH_3$

48. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الإستراتِ التاليةِ:

أ. بيوتيل إيثانوات

ب. إيثيل ميثانوات

ج. بروبيل بروبانوات

د. ميثيل بيوتانوات

49. سمِّ الأميناتِ التاليةَ:

أ. CH_3-NH_2

ب. $CH_3-CH_2-NH-CH_2-CH_3$

ج. $CH_3-CH_2-NH-CH_3$

د. $CH_3-\underset{CH_3}{\underset{|}{N}}-CH_3$

50. ارسمِ التراكيبَ البنائيَّةَ المختصرةَ لكلٍّ من الأميناتِ التاليةِ:

أ. بيوتيل إيثيل أمين

ب. إيثيل أمين

ج. ثنائيّ إيثيل ميثيل أمين

د. إيثيل بروبيل أمين

مراجعةٌ متنوعة

51. صنِّفْ كلاً من التفاعلاتِ التاليةِ كتفاعلِ حذفٍ أو تفاعلِ تكاثفٍ.

أ. $CH_3-C(Br)=CH_2 + NaNH_2 \rightarrow CH_3-C\equiv CH + NaBr + NH_3$

ب. $CH_3-CH_2-CH(OH)-CH_3 \xrightarrow[\text{حرارة}]{85\%\ H_3PO_4} CH_3-CH=CH-CH_3 + H_2O$

ج. $CH_3-CH_2-OH + CH_3-C(=O)-OH \rightarrow CH_3-CH_2-O-C(=O)-CH_3 + H_2O$

د. $C_6H_5-C(=O)H + CH_3-C(=O)-CH_3 \xrightarrow{OH^-} C_6H_5-CH=CH-C(=O)-CH_3 + H_2O$

52. سمِّ المركَّباتِ التالية:

أ. $CH_3-CH_2-CH_2-C(=O)-CH_2-CH_3$

ب. $CH_3-C(=O)-O-CH_2-CH_2-CH_3$

ج. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-C(=O)-OH$ (بفرع CH_3-CH_2- على الكربون الطرفي)

د. $CH_3-N(CH_3)-CH_2-CH_3$

هـ. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-C(=O)-H$

و. $CH_3-CH_2-O-CH_2-CH_2-CH_3$

ز. $CH_3-CH(Br)-CH_2-CH(Cl)_2$

ح. $C_6H_{11}-OH$ (هكسان حلقي مرتبط بـ OH)

53. صنِّفْ كلاً من التفاعلاتِ التاليةِ كتفاعلِ استبدالٍ، أو تفاعلِ إضافةٍ :

أ. $CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-OH + HCl \xrightarrow[\text{حرارة}]{ZnCl_2} CH_3-CH_2-CH_2-CH_2-Cl + H_2O$

ب. $CH_2=CH_2 + HBr \xrightarrow[25^{\circ}C]{\text{إيثر}} CH_3-CH_2-Br$

ج. $CH\equiv CH + HCl \xrightarrow{HgCl_2} CH_2=CH-Cl$

د. 1-ميثيل هكسين حلقي $+ HBr \xrightarrow{\text{إيثر}}$ 1-برومو-1-ميثيل هكسان حلقي (حلقة تحمل CH_3 و Br على الكربون نفسه)

54. ارسمِ الصيغَ البنائيَّةَ لكلٍّ من المركَّباتِ التاليةِ:

أ. 1، 2، 3-ثلاثيّ كلورو بروبان

ب. 1-بيوتانول

ج. إيثيل ميثيل إيثر

د. حمض بروبانويك

هـ. ميثيل بروبانوات

و. ثلاثيّ ميثيل أمين

55. حدِّد لكلٍّ مما يأتي إن كانَ المركَّبُ قد سمّيَ بشكلٍ صحيحٍ، وأعطِ الجوابَ الصحيحَ إن لم يكنْ كذلك.

أ. $CH_3-CH_2-CH(OH)-CH_3$
2-بيوتانول

ب. $CH_3-CH_2-CH_2-C(Br)_2-CH_3$
4-ثنائيّ برومو بنتان

ج. $CH_3-C(=O)-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$
إيثيل بنتانوات

د. $CH_3-NH-CH_2-CH_2-CH_3$
ميثيل بروبيل أمين

56. حدِّدْ لكلٍّ من التفاعلاتِ التاليةِ إن كانَ تفاعلَ إضافةٍ أم استبدالٍ، أم حذفٍ، أم تكاثفٍ.

أ. $CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-OH + CH_3-\overset{OH}{\overset{|}{CH}}-CH_3 \rightarrow CH_3-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-\overset{CH_3}{\overset{|}{CH}}-CH_3 + H_2O$

ب. $CH_2{=}CH-CH_3 + Cl_2 \rightarrow Cl-CH_2-\underset{Cl}{\underset{|}{CH}}-CH_3$

ج. $C_6H_{12} + Cl_2 \xrightarrow[\text{أو حرارة}]{\text{ضوء}} C_6H_{11}Cl + HCl$

د. $C_7H_{14}O \xrightarrow[50^\circ C]{H_3O^+ \text{ إيثر}} C_7H_{12} + H_2O$

تفكيرٌ ناقد

57. تطبيقُ أفكار: كيف يحفظُ جليكولُ الإيثيلين الماء في السيّاراتِ من التجمُّدِ في الشتاءِ، والغليان في الصيفِ.

58. توقُّعُ نتائج: هل يمكنُ لمجموعةٍ من جزيئاتِ 2،1–إيثانديول أن تكونَ ضعفَ عددِ الروابطِ الهيدروجينيَّةِ مقارنةً بكمّيَّةٍ مساويةٍ من جزيئاتِ الإيثانول؟ لماذا؟

بحثٌ وكتابة

59. شاعَتْ سابقًا مجموعةٌ من المركَّباتِ تعرفُ بـ PCBs بولي كلورو الديفينيلات polychlorinated biphenyls في عددٍ من التطبيقاتِ الصناعيَّةِ. جدِ الصيغةَ التركيبيَّةَ العامَّةَ لهذهِ المركَّباتِ، والخصائصَ التي جعلَتْ منها مقبولةً إلى هذا الحدِّ. أوجدْ كذلك السببَ الذي منعَ استخدامَ الـ PCBs لاحقًا في معظمِ الصناعاتِ.

60. أدّى الاستخدامُ الكبيرُ للبوليمراتِ الصناعيَّةِ إلى عددٍ من المشكلاتِ البيئيَّةِ في المجتمعِ الحديثِ. حدِّدْ بعضَ هذه المشكلاتِ، وما يمكنُ عملُه للحدِّ من تأثيرِها.

تقويمٌ بديل

61. أداء: افترضْ أنكَ أُعطيتَ عيِّناتٍ مجهولةً لكلٍّ من حمضِ البنزويكِ وكحولِ الإيثيلِ وثنائيِّ أمينو هكسان. صمِّمْ تجربةً للتمييزِ بينها. وإذا أقرَّ المعلِّمُ خطَّةَ عملِك، حدِّدِ الموادَّ المجهولةَ عمليًّا.

مشروعٌ علميٌّ

نفِّذْ واحدًا من المشاريعِ العلميَّةِ التاليةِ:

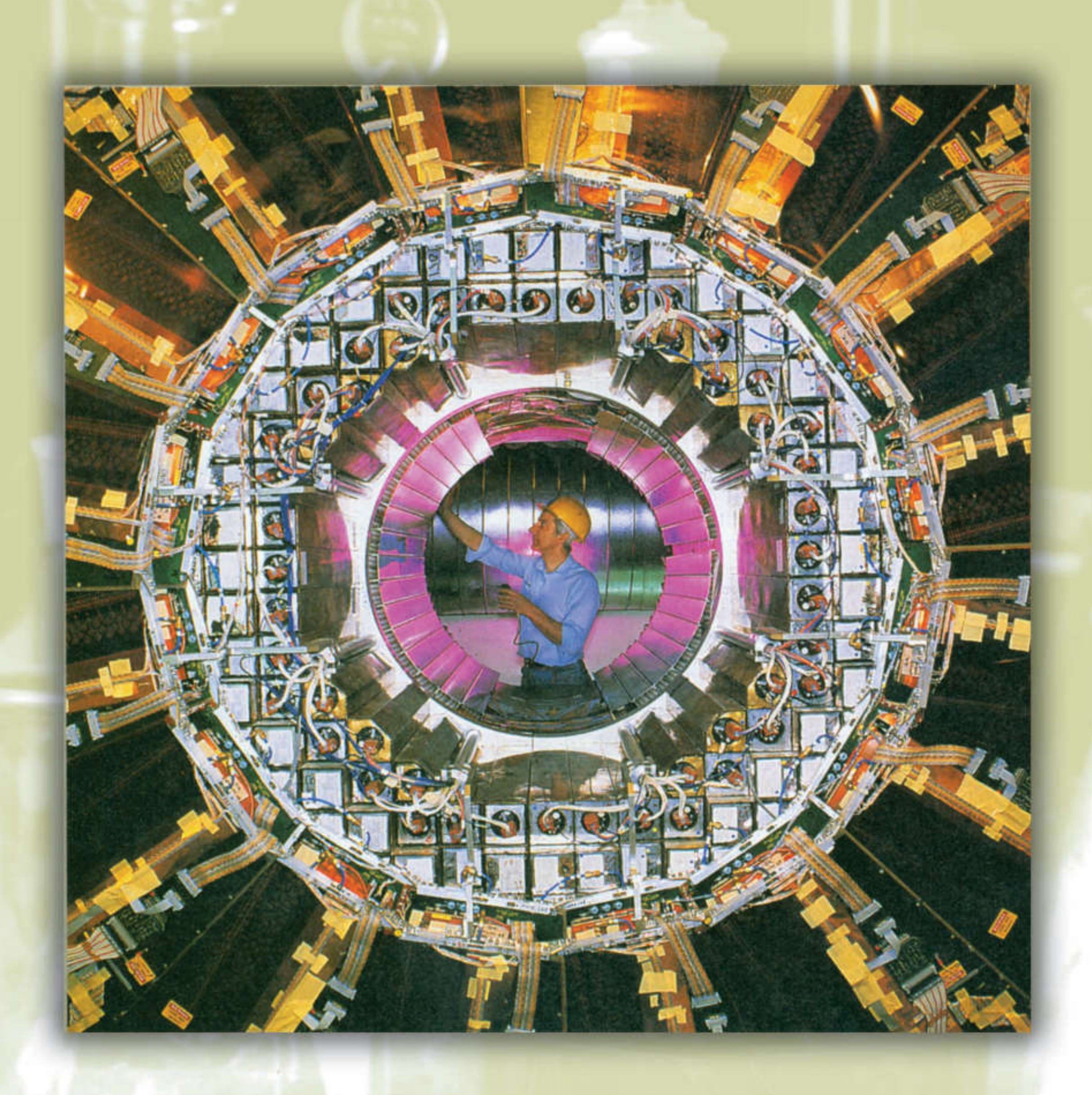
62. صمِّمْ مشروعًا علميًّا لتدرسَ كفاءةَ تحلُّلِ البلاستيكِ حيويِّ التحلُّلِ، أو «biodegradable» ثمّ نفِّذْ هذا التصميمَ.

63. موظِّفًا خصائصَ المركَّباتِ العضويَّةِ التي درسْتَها، صمِّمْ مشروعًا علميًّا ونفِّذْه لتصنيعِ كريمٍ مرطِّبٍ وملطِّفٍ للبشرةِ. حاولْ من خلالِ تغييرِ النسبِ أو التراكيزِ الوصولَ إلى النسبِ الأمثلِ لكلِّ مكوّنٍ في الكريمِ.

64. وظِّفْ كروماتوجرافيا الورقِ في التوصُّلِ إلى أهمِّ الملوِّناتِ المضافةِ للأغذيةِ.

الفصــل 12

الكيمياءُ النوويَّةُ



كاشفاتُ الإشعاعِ أدواتٌ مهمَّةٌ في دراسةِ الكيمياءِ النوويَّةِ

القســـم 1-12

النواة

مؤشّراتُ الأداءِ

- يعرِّفُ النويدةَ ويصفُ طرقَ التعبيرِ عنها.
- يُعرِّفُ: نقصَ الكتلةِ، وطاقةَ الربطِ النوويِّ، ويربطُ بينَهما.
- يفسِّرُ العلاقةَ بينَ عددِ النويّاتِ واستقرارِ الأنويةِ.
- يفسِّرُ سببَ حدوثِ التفاعلاتِ النوويَّةِ، وكيفيَّةِ وزنِ المعادلةِ النوويَّةِ.

تتكوَّنُ أنويةُ الذرّاتِ من بروتوناتٍ ونيوترونات، ***تُسمَّى مُجتمعةً بالنويّاتِ* nucleons**. ***وتُسمَّى الذرَّةُ في علمِ الكيمياءِ النوويَّةِ بالنويدةِ* nuclide*، التي يتمُّ تعرُّفَها من عددِ البروتوناتِ والنيوتروناتِ الموجودةِ في نواتِها* nucleus**. تُمثَّلُ النويداتُ بطريقتَيْن، عندَ استخدامِ الرموزِ كما في $^{228}_{88}Ra$، حيثُ يمثِّلُ الرقمُ العلويُّ العددَ الكُتليَّ، والرقمُ السفليُّ العددَ الذرّيَّ. ويمكنُ كتابةُ النويدةِ نفسِها على الشكلِ التالي: الراديوم–228، حيثُ يكتبُ العددُ الكتليُّ بعدَ اسمِ العُنصرِ.

نقصُ الكتلةِ والاستقرارُ النوويُّ

بما أن الذرَّةَ تتألَّفُ من البروتوناتِ والنيوتروناتِ والإلكتروناتِ فلا بُدَّ أن تكونَ كتلةُ الذرَّةِ حاصلَ جمعِ كلِ ما تحتوي عليهِ من هذهِ المُكوِّناتِ منفصلةً. لكنَّ هذا الأمرَ ليسَ واقعيًّا. لنتأمَّلْ ذرّةَ الهيليوم $^{4}_{2}He$ كمثالٍ، حيثُ حُسِبَتْ كُتلُ مُكوِّناتِ هذهِ الذرَّةِ مجتمعةً كما يلي:

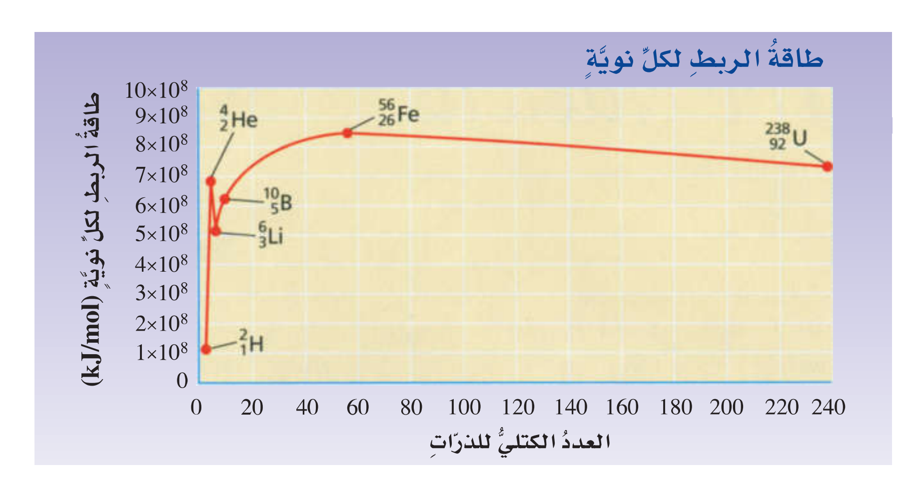
بروتونان:	2.014 552 amu = (2 × 1.007 276 amu)
نيوترونان:	2.017 330 amu = (2 × 1.008 665 amu)
إلكترونان:	0.001 097 amu = (2 × 0.000 548 6 amu)
مجموعُ الكتلِ مجتمعة:	4.032 979 amu

إلا أنَّ الكتلةَ الذرّيَّةَ المقيسةَ للهيليوم، هي 4.002 602 amu. هذا يعني أن هذهِ الكتلة أقلُّ بمقدارِ 0.030 377 amu من الكتلةِ المحسوبةِ أعلاه. ***يُطلقُ على هذا الفرقِ بينَ الكتلةِ المقيسةِ للذرّةِ ومجموعِ كُتلِ بروتوناتِها ونيوتروناتِها والكتروناتِها بنقصِ الكتلةِ* mass defect**.

طاقةُ الربطِ النوويِّ

ما الذي يُسبِّبُ هذا الفقدَ في الكتلةِ؟ وفقًا لمعادلةِ ألبرت أينشتاين $E = mc^2$، يمكنُ تحويلُ الكتلةِ m إلى طاقةٍ E، أو العكسُ. لذلك ينتجُ نقصُ الكتلةِ عن تحوُّلِ الكتلةِ إلى طاقةٍ، لدى تكوينِ النواةِ. ويمكنُ تحويلُ وحداتِ الكتلةِ لنقصِ الكتلةِ إلى وحداتِ طاقةٍ، باستخدامِ معادلةِ أينشتاين هذه، وبالطريقةِ التالية: حوِّلْ أوّلاً 0.030 377 amu إلى كيلوجرامٍ لموافقةِ قيمِ الكتلةِ الواردةِ في وحدةِ الطاقةِ $kg•m^2/s^2$، وكما يلي:

$$0.030\ 377\ \text{amu} \times \frac{1.6605 \times 10^{-27}\ \text{kg}}{1\ \text{amu}} = 5.0441 \times 10^{-29}\ \text{kg}$$



الشكل 12-1 يُبيِّنُ الرسمُ البيانيُّ هذا العلاقةَ بينَ طاقةِ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ والعددِ الكتليِّ للذرَّةِ. وتمثِّلُ طاقةُ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ مقياسًا لاستقرارِ نواةِ الذرَّةِ.

وتحسبُ الطاقةُ المكافئةُ الآنَ كالاتي:

$$E = mc^2$$
$$E = (5.0441 \times 10^{-29}\ kg)(3.00 \times 10^{8}\ m/s)^2$$
$$= 4.54 \times 10^{-12}\ kg{\bullet}m^2/s^2 = 4.54 \times 10^{-12}\ J$$

هذه هي قيمةُ **طاقةِ الربطِ النوويِّ nuclear binding energy** ***التي تُعرَفُ بأنَّها الطاقةُ المنطلقةُ لدى تكوُّنِ النواةِ من النويّاتِ***. ويمكنُ تعريفُ هذه الطاقةِ أيضًا بأنها الطاقةُ اللازمةُ لشطرِ النواةِ. بذلك تكونُ طاقةُ الربطِ النوويِّ أيضًا مقياسًا لاستقرارِ النواةِ.

طاقةُ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ

تستخدمُ طاقةُ الربطِ لكلِّ نويةٍ لمقارنةِ استقرارِ النويداتِ المختلفةِ، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 12-1. إن طاقةَ الربطِ لكلِّ نويةٍ هي طاقةُ الربطِ في النواةِ مقسومةً على عددِ النويّاتِ التي تحتوي عليها تلك النواةُ. وكلما زادَتِ طاقةُ الربطِ لكلِّ نويةٍ يزدادُ تماسكُ النويّاتِ. يكونُ للعناصرِ ذاتِ الكتلِ الذرّيَّةِ المتوسِّطةِ طاقاتُ ربطٍ في نويّاتِها هيَ الأكبرُ بين العناصرِ. ولذلك تكونُ هذه العناصرُ هي الأكثرُ استقرارًا.

النويّاتُ والاستقرارُ النوويُّ

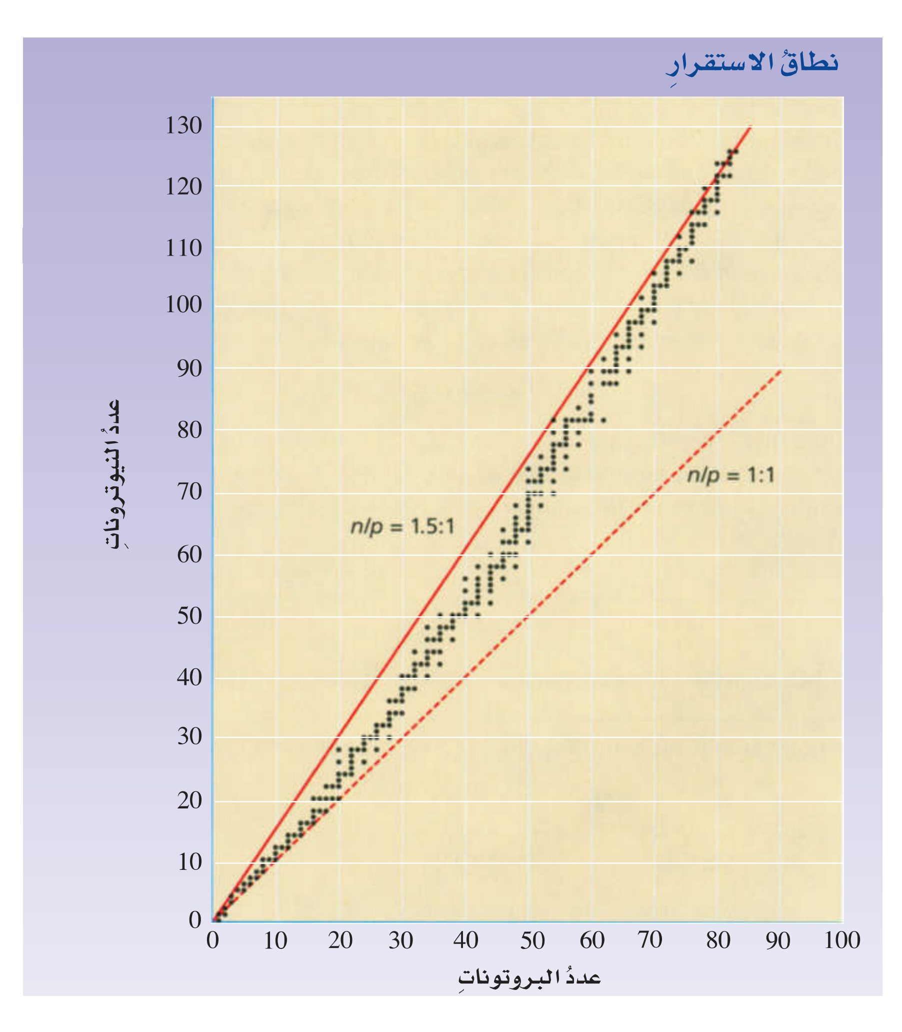
للنويداتِ المستقرَّةِ ميزاتٌ محدَّدةٌ. فعندَ رسمِ عددِ البروتوناتِ في الأنويةِ المستقرَّةِ مقابلَ عددِ النيوتروناتِ فيها، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 12-2، تحصلُ على رسمٍ بيانيٍّ شبيهٍ بالنطاقِ ويُسمّى تجمُّعُ الأنويةِ المستقرَّةِ على امتدادِ نسبِ النيوتروناتِ على البروتوناتِ ($\frac{n}{p}$) نطاقَ الاستقرارِ. وتكونُ الأنويةُ الأكثرُ استقرارًا بينَ الذرّاتِ ذاتِ الأعدادِ الذرّيَّةِ الصغيرةِ هي تلك التي تقاربُ نسبةَ النيوتروناتِ على البروتوناتِ فيها 1:1. مثلاً يكونُ $^{4}_{2}He$ نظيرًا مستقرًّا للهيليوم، حينَ يحتوي على نيوترونَين وبروتونَيْن وتكونُ نسبةُ $\frac{n}{p}$ تساوي 1:1. وبزيادةِ العددِ الذرّيِّ تزدادُ النسبةُ $\frac{n}{p}$ حتى تصلَ إلى 1:1.5. مثلاً، $^{206}_{82}Pb$ الذي يحتوي على 124 نيوترونًا و 82 بروتونًا تبلغُ نسبةُ $\frac{n}{p}$ فيه، 1:1.5.

وبالإمكانِ تفسيرُ هذا الميلِ من خلالِ العلاقةِ بينَ القوَّةِ النوويَّةِ والقوى الكهربائيَّةِ الساكنةِ بينَ البروتوناتِ. تتنافرُ البروتوناتُ في النواةِ بسببِ قوى التنافرِ الكهربائيَّةِ

معلوماتٌ إضافيَّةٌ

الكواركات

تمَّ اكتشافُ العديدِ من الجسيماتِ دونَ الذرِّيَّةِ subatomic. وتُعدُّ الليبتوناتُ leptons والكواركاتُ quarks جسيماتٍ أوَّليَّةً للمادَّةِ. فالإلكترونُ هو ليبتون، والبروتوناتُ والنيوتروناتُ مكوَّنةٌ من كواركاتٍ. وهناك ستَّةُ أنواعٍ من الكواركاتِ تختلفُ في الكتلةِ والشحنةِ. تُسمّى هذه الكواركاتُ فوقَ (up) وتحت (down) وغريب (strange) وساحر (charm)، وأسفل (bottom) وأعلى (top). تحتوي البروتوناتُ على كواركَيْ فوق وكوارك تحت ويحتوي النيوترونُ على كواركَيْ تحت وكواركِ فوق. وعلى الرغمِ من أن الكواركَ لم يُعزَلْ فإن وجودَهُ منفردًا يفسِّرُ أنماطَ الترابُطِ والانحلالِ.

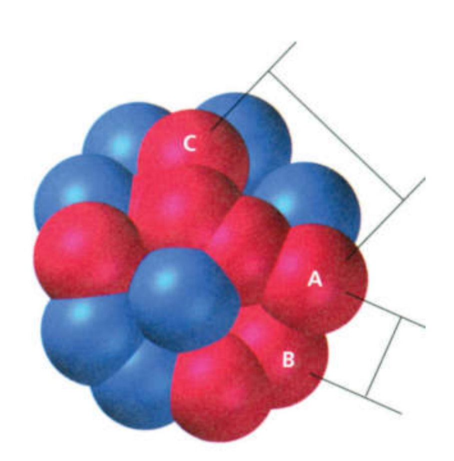


الشكل 12-2 نسبُ النيوترونات على البروتونات للأنوية المستقرَّة تتجمَّعُ في منطقة تعرفُ بنطاق الاستقرار. مع ازدياد عدد النيوترونات، تزدادُ النسبة من 1:1 إلى حوالي 1:1.5.

الساكنة. إلا أن المدى القصيرَ للقوّة النوويَّة يسمحُ لها فقطْ بجذب البروتونات القريبة جدًّا منها، كما يظهرُ في الشكل 12-3. كلما ازدادَ عددُ البروتونات في النواة تزدادُ قوى التنافر الكهربائيَّة الساكنة بين البروتونات بشكلٍ أسرعَ من القوّة النوويَّة، ممّا يستدعي توفُّرَ عددٍ أكبرَ من النيوترونات لزيادة القوّة النوويَّة، ولاستقرار النواة. وفوقَ العدد الذرّيّ 83، البزموث Bi، تصبحُ قوى تنافر البروتونات في النواة كبيرةً إلى درجةٍ لا تتوفَّرُ معها نويداتٌ مستقرَّةٌ.

تميلُ الأنويةُ المستقرَّةُ إلى أن يكونَ عندَها أعدادٌ زوجيَّةٌ من النويّات، ويحتوي أكثرُ من نصف النويدات المستقرَّة المعروفة على أعدادٍ زوجيَّةٍ لكلٍّ من البروتونات والنيوترونات، بينما تحتوي خمسُ أنويةٍ مستقرَّةٍ فقطْ على أعدادٍ فرديَّةٍ من البروتونات والنيوترونات. هذا يؤشِّرُ على أن استقرارَ النواة يكونُ الأكبرَ عندما تكونُ النويّاتُ كالإلكترونات زوجيَّةً.

إن أكثرَ النويدات استقرارًا هي تلك التي تحتوي على أحد الأعداد التالية: 2، 8، 20، 28، 50، 82، أو 126 بروتونًا، أو نيوترونًا، أو نويَّةً كلّيَّةً. إن هذا الاستقرارَ الزائدَ عندَ بعض الأعداد يساندُ النظريَّةَ القائلةَ بأن النويّات، كالإلكترونات تقعُ عندَ مستويات طاقةٍ معيَّنةٍ. ووفقًا لنموذج الطبقة النوويَّة **nuclear shell model** *تقعُ النويّاتُ عندَ مستويات طاقةٍ أو طبقاتٍ مختلفةٍ داخلَ النواة. ويُطلقُ على أعداد النويّات التي تمثّلُ مستويات طاقةٍ نوويَّةٍ مُكتملةٍ 2، 8، 20، 28، 50، 82، 126، تسميةُ* **الأعداد السحريَّة magic numbers**.



الشكل 12-3 يجذبُ البروتونُ A البروتونَ B بتأثير القوَّة النوويَّة، لكنَّهُ يتنافرُ معه من خلال القوَّة الكهربائيَّة الساكنة. يتنافرُ بروتونُ A وبروتونُ C بشكلٍ أساسيٍّ من خلال القوَّة الكهربائيَّة الساكنة، لأن تأثيرَ القوَّة النوويَّة يظهرُ في جزءٍ من محيط النويَّة فقط.

التفاعلاتُ النوويَّةُ

تخضعُ الأنويةُ غيرُ المستقرَّةِ لتغيُّراتٍ تلقائيَّةٍ تتغيَّرُ فيها أعدادُ البروتوناتِ والنيوترونات. في هذهِ العمليَّةِ تُطلقُ هذهِ الأنويةُ كمّيّاتٍ كبيرةً من الطاقةِ، فيزدادُ استقرارُها. وتُعدُّ هذهِ التغيُّراتُ نوعًا من التفاعلِ النوويّ. **فالتفاعلُ النوويُّ nuclear reaction** ***تفاعلٌ يؤثِّرُ في نواةِ الذرَّةِ.*** وفي المعادلاتِ الممثِّلةِ للتفاعلاتِ النوويَّةِ يجبُ أن يكونَ مجموعُ الأعدادِ الذرّيَّةِ ومجموعُ الأعدادِ الكتليَّةِ متساويَيْنِ في طرفَيِ المعادلةِ. كما هو مبيَّنٌ في المثالِ التالي:

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

لاحظْ أنهُ عندما يتغيَّرُ العددُ الذرّيُّ تتغيَّرُ هويَّةُ العُنصرِ. يعرَّفُ **التحوُّلُ النوويُّ transmutation** ***على أنه تغيُّرٌ في هويةِ النواةِ، ينتجُ عن تغيُّرٍ في عددِ بروتوناتِها.***

مسألةٌ نموذجيةٌ 1-12

حدِّدِ الناتجَ الذي يوازنُ التفاعلَ النوويَّ التالي: $^{212}_{84}Po \rightarrow ^{4}_{2}He + \underline{?}$

الحلّ

1. يجبُ أن يتساوى العددان الكلّيان للأعدادِ الذرّيَّةِ والكتليَّةِ على طرفَيِ المعادلةِ:

$$^{212}_{84}Po \rightarrow ^{4}_{2}He + \underline{?}$$

العددُ الكتليُّ: $212 - 4 = 208$ والعددُ الذرّيُّ: $84 - 2 = 82$

2. العددُ الكتليُّ للنويدةِ = 208، وعددُها الذريُّ = 82، $^{208}_{82}Pb$.
3. تكونُ المعادلةُ النوويَّةُ الموزونةُ كالتالي: $^{212}_{84}Po \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{208}_{82}Pb$

تمارينُ تطبيقية

إذا كانَ $^{1}_{0}n$ يمثِّلُ النيوترونَ، و $^{0}_{-1}e$ يمثِّلُ الإلكترونَ، فأكمل المعادلاتِ النوويَّةَ التاليةَ:

1. $^{253}_{99}Es + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{1}_{0}n + \underline{?}$
2. $^{142}_{61}Pm + \underline{?} \rightarrow ^{142}_{60}Nd$

الجواب

1. $^{253}_{99}Es + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{1}_{0}n + ^{256}_{101}Md$
2. $^{142}_{61}Pm + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{142}_{60}Nd$

مراجعةُ القسمِ 1-12

1. عرِّفْ نقصَ الكتلةِ.
2. كيفَ ترتبطُ الاستقرارَ النوويَّ بنسبةِ النيوتروناتِ إلى البروتوناتِ؟
3. أكملِ المعادلاتِ النوويَّةَ التاليةَ وزِنْها.

أ. $^{187}_{75}Re + \underline{?} \rightarrow ^{188}_{75}Re + ^{1}_{1}H$

ب. $^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow \underline{?} + ^{1}_{0}n$

ج. $^{22}_{11}Na + \underline{?} \rightarrow ^{22}_{10}Ne$

تفكيرٌ ناقد

4. **تفسيرُ رسمٍ بياني:** افحصِ الشكلَ 12-2 وتوقَّعْ إن كانَ $^{9}_{3}Li$ نظيرًا مستقرًّا لليثيومِ. علِّلْ إجابتَك.

القســم 12-2

مؤشّراتُ الأداءِ

- يعرّفُ الانحلالَ الإشعاعيَّ والإشعاعَ النوويَّ ويربطُ بينَهما.
- يصفُ أنواعَ الانحلالِ الإشعاعيِّ، وتأثيراتِها على النواةِ.
- يعرّفُ عمرَ النصفِ، ويفسِّرُ علاقتَهُ باستقرارِ النواةِ.
- يعرّفُ المفاهيمَ: سلسلةَ الانحلالِ، النويدةَ الأمَّ، النويدةَ الوليدةَ.
- يوضحُ كيفيَّةَ إنتاجِ نويداتٍ مشعَّةٍ اصطناعيَّةٍ.

الانحلالُ الإشعاعيُّ

في سنةِ 1896 درسَ هنري بيكريل العلاقةَ المحتملةَ بينَ الانبعاثِ الضوئيِّ لبعضِ مركَّباتِ اليورانيوم، بعدَ تعريضِها لضوءِ الشمسِ، وبينَ انبعاثِ أشعَّةِ X منها. قامَ بيكريل بلفِّ لوحٍ فوتوغرافيٍّ بغطاءٍ لا ينفذُ منهُ الضوءُ، ووضعَ مركَّبًا لليورانيوم فوقَهُ، ثم عرَّضَهُ لضوءِ الشمسِ. لاحظَ أنَّ اللوحَ الفوتوغرافيَّ يتعرَّضُ للأشعَّةِ، وإن كانَ محميًّا من ضوءِ الشمسِ. جعلَهُ ذلكَ يعتقدُ أنَّ سببَ هذا التعرُّضِ هو أشعَّةُ X المنبعثةُ من مركَّبِ اليورانيوم. وعندَما حاولَ إعادةَ التجربةِ منعَهُ الطقسُ الملبَّدُ بالغيومِ من تعريضِ اليورانيومِ لضوءِ الشمسِ. لكنَّهُ دهُشَ عندَما وجدَ أنَّ اللوحَ الفوتوغرافيَّ كانَ قد تعرَّضَ للأشعَّةِ، بالرغمِ من ذلكَ، مما يعني أنَّ ضوءَ الشمسِ ليسَ مهمًّا في هذه العمليَّةِ. وأنَّ الأشعَّةَ التي أثَّرَتْ في اللوحِ نتجَتْ عن الانحلالِ الإشعاعيِّ. إنَّ **الانحلالَ الإشعاعيَّ radioactive decay** ***عمليَّةُ انحلالٍ تلقائيٍّ للنواةِ، تتحوَّلُ بموجبِها هذه النواةُ إلى نواةٍ أخفَّ نسبيًّا، مع إطلاقِ جسيماتٍ، أو أشعَّةٍ كهرومغنطيسيَّةٍ، أو كلتيهما.*** إنَّ الأشعَّةَ التي أصابَتِ اللوحَ الفوتوغرافيَّ هي **إشعاعٌ نوويٌّ nuclear radiation**، ***وهو جسيماتٌ، أو إشعاعٌ كهرومغنطيسيٌّ انبعثَ من النواةِ خلالَ عمليَّةِ الانحلالِ الإشعاعيِّ.***

اليورانيومُ هو **نويدةٌ مشعَّةٌ radioactive nuclide**، ***مكوَّنةٌ من نواةٍ غيرِ مستقرَّةٍ، تخضعُ للانحلالِ الإشعاعيِّ.*** وقد أظهرَتْ دراساتٌ أجرتْها مدامُ كوري وزوجُها بيير كوري أنَّ من بينِ العناصرِ المعروفةِ عامَ 1896 لم يكنْ إلا اليورانيومُ والثوريومُ عنصرَيْنِ مشعَّيْنِ. وفي سنةِ 1898، اكتشفَ العالمانِ كوري عنصرَيْنِ مشعَّيْنِ آخرَيْنِ، هما البولونيومُ والراديومُ. ومنذُ ذلكَ التاريخِ حُدِّدتْ هويةُ الكثيرِ من النويداتِ المشعَّةِ. وفي الحقيقةِ تكونُ جميعُ النويداتِ ذاتِ العددِ الذريِّ الأكبرِ من 83، غيرَ مستقرَّةٍ، وبذلكَ تكونُ مشعَّةً.

أنواعُ الانحلالِ الإشعاعيِّ

يعتمدُ نوعُ النويدةِ وسرعةُ انحلالِها على مكوِّناتِها ومستوى طاقةِ النواةِ. في الجدولِ 12-1 أدناهُ ملخَّصٌ لبعضِ الأنواعِ الشائعةِ من الإشعاعاتِ النوويَّةِ.

الجدول 12-1 الإشعاعاتُ النوويَّةُ

النوع	الرمز	الشحنة	الكتلة (amu)
جُسَيمُ ألفا	$^{4}_{2}He$	2+	4.001 5062
جُسَيمُ بيتّا	$^{0}_{-1}\beta$	1–	0.000 5486
البوزيترون	$^{0}_{+1}\beta$	1+	0.000 5486
أشعَّةُ جاما	γ	0	0

الشكل 4-12 ينبعثُ جسيمُ ألفا المماثلُ لنواةِ الهيليوم، لدى انحلالِ بعضِ الأنويةِ الثقيلةِ.

انبعاثُ ألفا

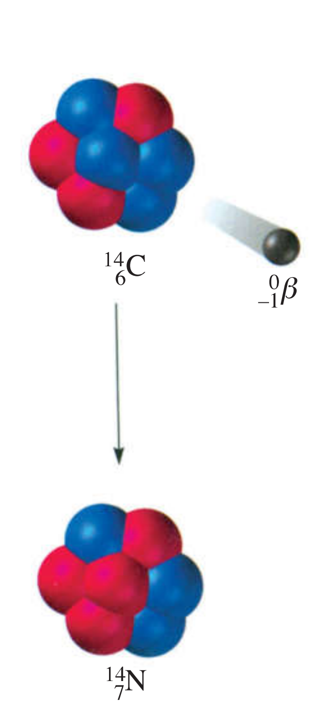
يتكوّنُ جسيمُ ألفا (α) alpha particle من بروتونَيْن ونيوترونَيْن متماسكَيْن، وهو ينبعثُ من النواةِ خلالَ بعضِ أنواعِ الانحلالِ الإشعاعيّ. إن جسيماتِ ألفا هي أنويةُ هيليوم، شحنتُها +2، وتمثَّلُ غالبًا بالرمزِ $^{4}_{2}He$. ينحصرُ انبعاثُ ألفا بانحلالِ الأنويةِ الثقيلةِ. في هذه الأنويةِ يجبُ أن يتضاءلَ كلٌّ من عددِ النيوتروناتِ وعددِ البروتوناتِ لزيادةِ استقرارِ النواةِ. من الأمثلةِ على انبعاثِ ألفا، انحلالُ $^{210}_{84}Po$ إلى $^{206}_{82}Pb$، كما هو مبيَّنٌ في الشكلِ 12-4. وفي هذا التحوُّلِ ينقصُ العددُ الذريُّ بمقدارِ 2، وينقصُ العددُ الكتليُّ بمقدارِ 4.

$$^{210}_{84}Po \rightarrow ^{206}_{82}Pb + ^{4}_{2}He$$

انبعاثُ بيتّا

تكونُ النويداتُ الموجودةُ فوقَ نطاقِ الاستقرارِ غيرَ مستقرَّةٍ، لأن نسبةَ النيوتروناتِ إلى البروتوناتِ (n/p) فيها كبيرةٌ جدًّا. ولتقليلِ عددِ النيوتروناتِ يمكنُ تحويلُ النيوترون إلى بروتونٍ وإلكترونٍ. ينبعثُ الإلكترونُ من النواةِ كجسيمِ بيتّا. **فجسيمُ بيتا (β) beta particle** ***إلكترونٌ منبعثٌ من النواةِ خلالَ بعضِ أنواعِ الانحلالِ الإشعاعيّ.***

$$^{1}_{0}n \rightarrow ^{1}_{1}p + ^{0}_{-1}\beta$$



الشكل 5-12 يسبِّبُ انبعاثُ بيتّا تحوُّلاً نوويًّا لـ $^{14}_{6}C$ إلى $^{14}_{7}N$. إن انبعاثَ بيتّا نوعٌ من الانحلالِ الإشعاعيِّ يتحوَّلُ فيه نيوترونٌ إلى بروتونٍ وإلكترونٍ، ينبعثُ الإلكترونُ على شكلِ جُسيمِ بيتّا.

ويبيِّنُ الشكلُ 12-5 مثالاً على انبعاثِ بيتّا من خلالِ انحلالِ $^{14}_{6}C$ إلى $^{14}_{7}N$. لاحظْ أن العددَ الذرّيَّ يزدادُ بمقدارِ 1 ويبقى العددُ الكتليُّ دونَ تغييرٍ.

$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + ^{0}_{-1}\beta$$

انبعاثُ البوزيترونِ

تكونُ النويداتُ الموجودةُ تحتَ نطاقِ الاستقرارِ غيرَ مستقرَّةٍ، لأنَ نسبةَ (n/p) نسبةٌ صغيرةٌ جدًّا. لتقليلِ عددِ البروتوناتِ، يتحوَّلُ بروتونٌ إلى نيوترونٍ عبرَ انبعاثِ بوزيترونٍ. **فالبوزيترونُ positron** ***جسيمٌ له كتلةُ الإلكترونِ نفسُها، لكنَّ شحنتَهُ موجبةٌ. والبوزيترونُ ينبعثُ من النواةِ أثناءَ بعضِ أنواعِ الانحلالِ الإشعاعيِّ.***

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{+1}\beta$$

ومن الأمثلةِ على انبعاثِ البوزيترونِ انحلالُ $^{38}_{19}K$ إلى $^{38}_{18}Ar$. لاحظ أن العددَ الذريَّ يقلُّ بمقدارِ 1، فيما يبقى العددُ الكتليُّ كما هو.

$$^{38}_{19}K \rightarrow {}^{38}_{18}Ar + {}^{0}_{+1}\beta$$

أسْرُ الإلكترونِ (الأسْرُ الإلكترونيُّ)

هو نوعٌ آخرُ من أنواعِ النشاطِ الإشعاعيِّ للنويداتِ التي لها نسبةُ (n/p) صغيرةٌ جدًّا. وفي **الأسْرِ الإلكترونيِّ electron capture**، ***تلتقطُ نواةُ الذرَّةِ إلكترونًا من فلكٍ داخليٍّ لهذهِ الذرَّةِ***. ويتَّحدُ هذا الإلكترونُ مع بروتونٍ لتكوينِ نيوترونٍ.

$$^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n$$

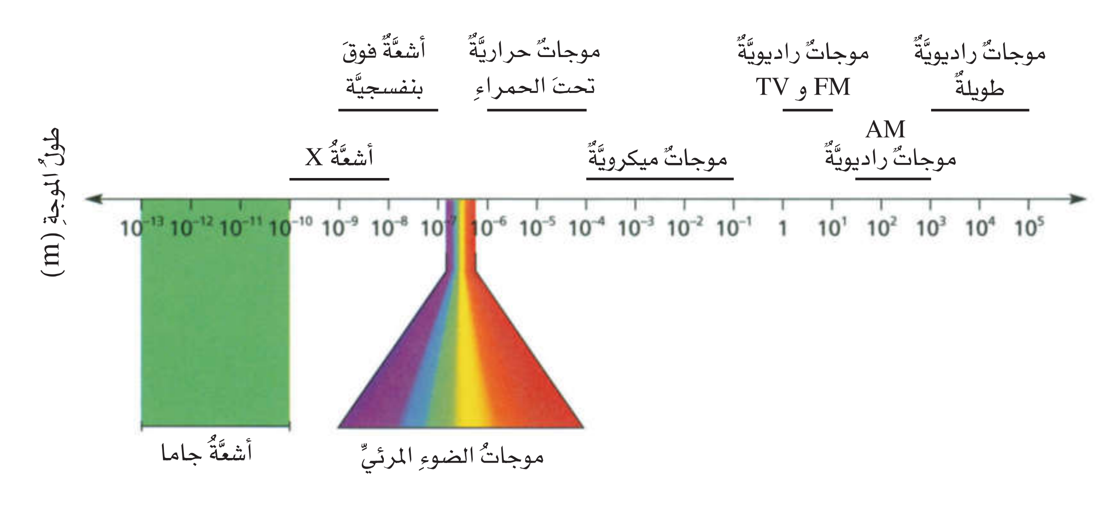
ومن الأمثلةِ على الأسْرِ الإلكترونيِّ الانحلالُ الإشعاعيُّ لـ $^{106}_{47}Ag$ إلى $^{106}_{46}Pd$. وكما في حالةِ انبعاثِ البوزيترونِ، ينقصُ العددُ الذريُّ بمقدارِ 1، ويبقى العددُ الكتليُّ كما هو.

$$^{106}_{47}Ag + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{106}_{46}Pd$$

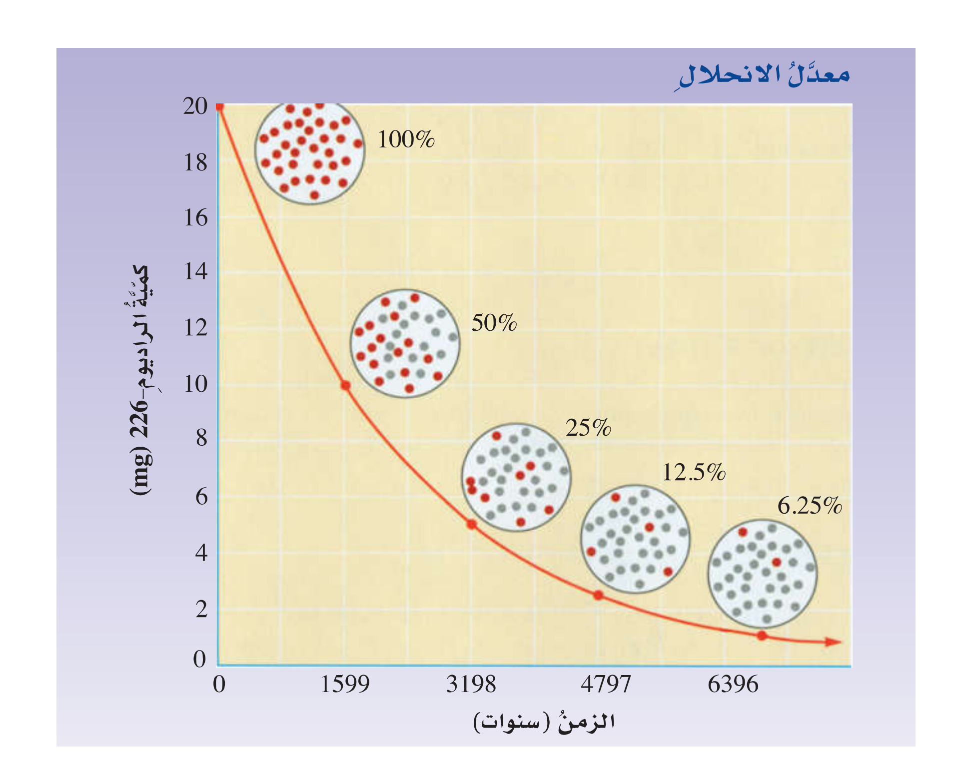
انبعاثُ جاما

أشعَّةُ جاما (γ) gamma rays ***موجاتٌ كهرومغنطيسيَّةٌ ذاتُ طاقةٍ عاليةٍ تنبعثُ من النواةِ لدى تحوُّلِها من حالةٍ مستثارةٍ إلى حالةِ الطاقةِ الأرضيَّةِ***. يظهرُ موقعُ أشعَّةِ جاما في طيفِ الأشعَّةِ الكهرومغنطيسيَّةِ في الشكل 12-6. إن انبعاثَ أشعَّةِ جاما دليلٌ آخرُ يدعمُ نموذجَ الطبقةِ النوويَّةِ. ووفقًا لهذا النموذجِ، فإن أشعَّةَ جاما تتكوَّنُ لدى انتقالِ الجُسَيماتِ النوويَّةِ ضمنَ مستوياتِ الطاقةِ النوويَّةِ. وهي شبيهةٌ بانبعاثِ الفوتوناتِ (ضوءٍ أو أشعَّةِ X) لدى انتقالِ الإلكترونِ من مستوى طاقةٍ أعلى إلى مستوى طاقةٍ أقلّ. انبعاثُ جاما يعقبُ عادةً أنواعًا أخرى من الانحلالِ الذي يتركُ النواةَ في حالةِ استثارةٍ.

الشكل 12-6 تشبهُ أشعَّةُ جاما الضوءَ المرئيَّ، من حيثُ أنَّهما أشعَّةٌ كهرومغنطيسيَّةٌ. إلا أن لأشعَّةِ جاما طولاً موجيًّا قصيرًا جدًّا، وبالتالي طاقةً أعلى من طاقةِ الضوءِ المرئيِّ.



الشكل 12-7 عمرُ النصفِ للراديومِ–226 يبلغُ 1599 سنةً. نصفُ ما يتبقّى من الراديومِ–226 ينحلُّ في نهايةِ كلِّ عمرِ نصفٍ إضافيٍّ.



عُمرُ النصفِ

لا ينحلُّ نظيرانِ مشعّانِ بسرعةٍ واحدة. **فعمرُ النصفِ half-life**، $t_{1/2}$، ***هو الزمنُ اللازمُ لانحلالِ نصفِ كمّيَّةِ ذرّاتِ نويدةٍ مشعَّةٍ.*** تأمّلِ الرسمَ البيانيَّ لانحلالِ الراديومِ–226 في الشكل 12-7. إن عمرَ النصفِ للراديومِ–226 يبلغُ 1599 سنةً. وهذا يعني أنّ نصفَ الكمّيَّةِ المعطاةِ من الراديومِ–226، سوفَ ينحلُّ بعد 1599 سنةً. وبعدَ 1599 سنةً أخرى، ينحلُّ نصفُ كمّيَّةِ الراديومِ–226 المتبقيَّةِ. وتستمرُّ هذه العمليَّةُ حتى لا يبقى إلاّ كمّيَّةٌ ضئيلةٌ جدًّا من الراديومِ–226. لكلِّ نويدةٍ مشعَّةٍ عمرُ نصفٍ خاصٌّ بها. والنويداتُ الأكثرُ استقرارًا تنحلُّ ببطءٍ ولها عمرُ نصفٍ أطوَلُ. والنويداتُ الأقلُّ استقرارًا تنحلُّ بسرعةٍ، ويكونُ لها عمرُ نصفٍ قصيرٌ جدًّا، ولا يتعدّى بضعةَ أجزاءٍ من الثانيةِ أحيانًا. في الجدول 12-2 قائمةٌ ببعضِ النويداتِ المشعَّةِ المعروفةِ، يقابلُها عمرُ النصفِ لكلٍّ منها.

الجدول 12-2 نويداتٌ مشعَّةٌ معروفةٌ مع عُمرِ النصفِ

النويدة	عمرُ النصفِ	النويدة	عمرُ النصفِ
$^{3}_{1}H$	12.32 سنةً	$^{214}_{84}Po$	163.7 μs
$^{14}_{6}C$	5715 سنةً	$^{218}_{84}Po$	3.0 دقائق
$^{32}_{15}P$	14.28 يومًا	$^{218}_{85}At$	1.6 ثانية
$^{40}_{19}K$	1.3×10^{9} سنةٍ	$^{238}_{92}U$	4.46×10^{9} سنةٍ
$^{60}_{27}Co$	5.27 سنواتٍ	$^{239}_{94}Pu$	2.41×10^{4} سنةٍ

مسألةٌ نموذجية 2-12

للفوسفورِ-32 عمرُ نصفٍ مقدارُه 14.3 يومًا، ما كتلةُ الفوسفورِ-32 (mg) المتبقّيةُ بعد 57.2 يومًا، إذا ابتدأت بـ 4.0 mg من النظيرِ؟

الحلّ

1 حلّلْ

المعطى: الكتلةُ الأصليَّةُ للفوسفورِ-32 = 4.0 mg

عمرُ النصفِ للفوسفورِ-32 = 14.3 يومًا

الزمنُ المنقضي = 57.2 يومًا

المجهولُ: كتلةُ الفوسفورِ-32 المتبقّيةُ بعدَ 57.2 يومًا

2 خطِّطْ

لتحديدِ كتلةِ (mg) الفوسفورِ-32 المتبقّيةِ يجبُ أن تعرفَ أوّلاً كم عمرُ نصفٍ مرَّ خلالَ الزمنِ المنقضي، ثمَّ تُحدِّدُ كمّيّةَ الفوسفورِ-32 من خلالِ اختصارِ الكمّيَّةِ الأصليَّةِ إلى النصفِ، لكلِّ فترةِ عمرِ نصفٍ مرَّتْ.

$$\text{عددُ أعمارِ النصف} = \text{الزمنَ المنقضي (أيام)} \times \frac{\text{1 عمرِ نصفٍ}}{\text{14.3 يومًا}}$$

$$\text{كمّيّةُ الفوسفورِ-32 المتبقّية} = \text{كمّيّةَ الفوسفورِ-32 الأصليَّةَ} \times \frac{1}{2} \text{ لكلِّ عمرِ نصفٍ}$$

3 احسبْ

$$\text{عددُ أعمارِ النصف} = \text{57.2 يومًا} \times \frac{\text{1 عمرِ نصفٍ}}{\text{14.3 يومًا}} = \text{4 أعمارِ نصفٍ}$$

$$\text{كمّيّةُ الفوسفورِ-32 المتبقّية} = 4.0\ mg \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times \frac{1}{2} = 0.25\ mg$$

4 قيِّمْ

إن فترةَ 57.2 يومًا هي 4 أضعافِ عمرِ النصفِ للفوسفورِ-32. في نهايةِ عمرِ النصفِ الأوّلِ، يبقى 2.0 mg من الفوسفورِ-32، ويبقى 1.0 mg في نهايةِ عمرِ النصفِ الثاني. ويبقى 0.50 mg في نهايةِ عمرِ النصفِ الثالثِ. ويبقى 0.25 mg في نهايةِ عمرِ النصفِ الرابعِ.

تمارينُ تطبيقيَّة

1. عمرُ النصفِ للبولونيوم-210 هو 138.4 يومًا. ما كتلةُ البولونيوم-210 (mg) المتبقّيةُ بعد 415.2 يومًا، إذا ابتدأتَ بـ 2.0 mg من النظيرِ؟
2. عمرُ النصفِ للكوبالت-60 هو 5.27 سنواتٍ. ما كتلةُ الكوبالتِ-60 (mg) المتبقيّةُ بعدَ 52.7 سنةً، إذا ابتدأتَ بـ 10.0 mg منه؟

الجواب

1. 0.25 mg
2. 0.00977 mg

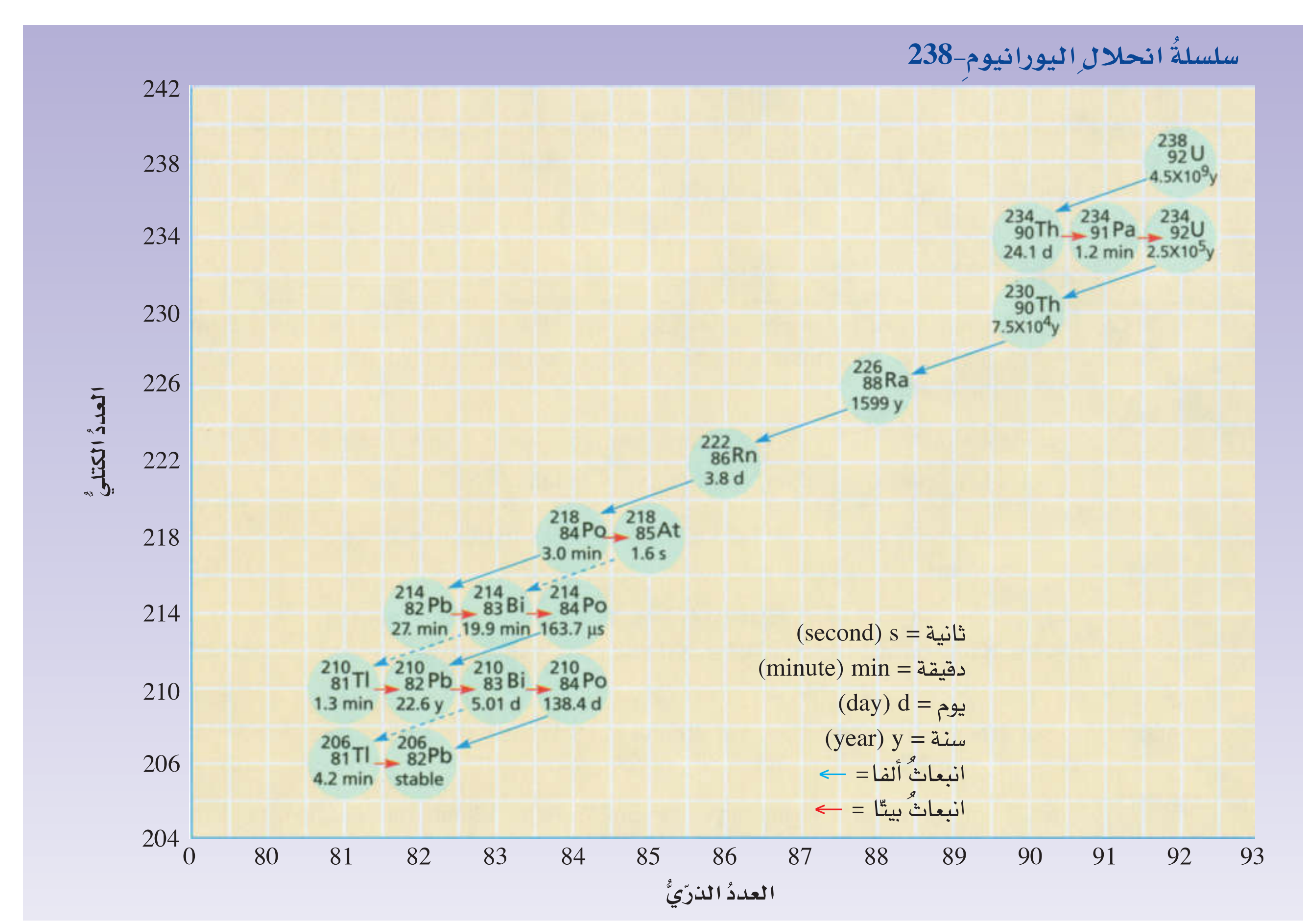
سلاسلُ الانحلالِ

لا يكفي دائمًا حدوثُ تفاعلٍ نوويٍّ واحدٍ لإنتاجِ نوَيدةٍ مستقرَّةٍ. **سلسلةُ الانحلالِ decay series** ***هي سلسلةٌ من نويداتٍ مشعَّةٍ تُنتجُ من انحلالاتٍ إشعاعيَّةٍ متعاقبةٍ حتى الوصولِ إلى نويدةٍ مستقرَّةٍ.*** ***تُسمّى النويدةُ الأثقلُ في كلِّ سلسلةِ انحلالٍ*** **بالنوَيدةِ الأمِّ parent nuclide** ***فيما تُسمّى النويداتُ الناتجةُ من انحلالِ النوَيدةِ الأمِّ*** **بالنوَيداتِ الوليدةِ daughter nuclides**. جميعُ النوَيداتِ الطبيعيَّةِ ذاتِ العددِ الذرِّيِّ الأكبرِ من 83 هي نوَيداتٌ مشعَّةٌ، وتنتمي إلى واحدةٍ من سلاسلِ الانحلالِ الطبيعيَّةِ الثلاثِ. النوَيداتُ الأمُّ، هي اليورانيومُ-238، واليورانيومُ-235، والثوريومُ-232. في الشكلِ 8-12 تُعرضُ التحوُّلاتُ النوويَّةُ لسلسلةِ انحلالِ اليورانيومِ-238.

حدِّدْ على المخطَّطِ النويدةَ الأمَّ، لليورانيوم-238. لدى انحلالِ نواةِ اليورانيوم-238 ينبعثُ منها جُسَيمُ ألفا. ينخفضُ نتيجةً لذلك العددُ الكتليُّ للنويدةِ بمقدارِ 4، وكذلك الموقعُ العموديُّ لها في المخطَّطِ. وينخفضُ العددُ الذرّيُّ، وبالتالي الموقعُ الأفقيُّ لها بمقدارِ 2. النويدةُ الوليدةُ هي نظيرٌ للثوريومِ.

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}Th + ^{4}_{2}He$$

الشكل 8-12 يُظهرُ هذا المخطَّطُ التحوُّلَ النوويَّ، الذي يحدثُ عندَ انحلالِ $^{238}_{92}U$ إلى النوَيدةِ النهائيَّةِ المستقرَّةِ $^{206}_{82}P$. يتّبِعُ الانحلالُ الأسهمَ السميكةَ في المخطَّطِ، بينَما تمثِّلُ الخطوطُ المتقطعةُ المساراتِ البديلةَ للانحلالِ.



يبلغُ عمرُ النصفِ لـ $^{234}_{90}Th$ حوالي 24 يومًا، كما هو موضَّحٌ على المخطَّطِ، وتنحلُّ نوَيدةُ الثوريوم بإطلاقِ جسيماتِ بيتّا. يؤدي انبعاثُ بيتّا إلى زيادةِ العددِ الذرّيِّ. وبطبيعةِ الحالِ يتغيَّرُ الموقعُ الأفقيُّ في المخطَّطِ بمقدارِ 1، ويبقى العددُ الكتليُّ والموقعُ العموديُّ في المخطَّطِ ثابتيْن.

$$^{234}_{90}Th \rightarrow \, ^{234}_{91}Pa + \, ^{0}_{-1}\beta$$

وما يظهرُ على مخطَّطِ الانحلالِ أيضًا من تغيُّراتِ الأعدادِ الذرِّيةِ والأعدادِ الكتليَّةِ المتبقيَّةِ يفسَّرُ على أساسِ الجُسيماتِ المنبعثةِ من النوَيداتِ. ففي الخطوةِ الأخيرةِ يفقدُ $^{210}_{84}Po$ جسيمَ ألفا، ليكوِّنَ $^{206}_{82}Po$، وهو نظيرُ الرصاصِ المستقرُّ وغيرُ المشعِّ. لاحظْ أن $^{206}_{82}Po$ يحتوي على 82 بروتونًا، وهو عددٌ سحريٌّ، ويحتوي أيضًا على ترتيبٍ نوويٍّ مستقرٍّ جدًّا مكوَّنٍ من طبقةٍ نوويَّةٍ مكتملةٍ.

التحوُّلاتُ النوويَّةُ الاصطناعيَّةُ

النويداتُ المشعَّةُ الاصطناعيَّةُ هي نوَيداتٌ مشعَّةٌ لا تتوافرُ طبيعيًّا على كوكبِ الأرضِ، بل تُصنَّعُ بطريقةِ **التحوُّلاتِ النوويَّةِ الاصطناعيَّةِ artificial transmutations**. ***ويتمُّ ذلكَ بقذفِ الأنويةِ بجسيماتٍ مشحونةٍ، أو غيرِ مشحونةٍ***. وبما أن النيوتروناتِ جسيماتٌ غيرُ مشحونةٍ، فبإمكانِها اختراقُ نواةِ الذرَّةِ بسهولةٍ. بينما لا تتمكَّنُ جُسيماتُ ألفا الموجبةُ الشحنةِ أو البروتوناتُ وغيرُها من الأيوناتِ من اختراقِ النواةِ بسهولةٍ لتنافرِها معها. وبسببِ هذا التنافرِ، لا بُدَّ من توفُّرِ كمّياتٍ كبيرةٍ من الطاقةِ لقذفِ النواةِ، بهذه الجُسيماتِ، لكي تتمكَّنَ من اختراقِها. يمكنُ توفيرُ هذهِ الطاقةِ من خلالِ تسريعِ هذه الجُسيماتِ داخلَ مجالٍ مغنطيسيٍّ أو كهربائيٍّ لمسرِّعِ الجُسَيماتِ، يظهرُ مثالٌ عليه في الشكلِ 12-9.

الشكل 12-9 منظرٌ جوّيٌّ لمختبرِ المسرِّعِ الدوليِّ (فيرمي لاب) في ألينوي– أميركا. مسرِّعاتُ الجسيماتِ موجودةٌ تحتَ الأرضِ. ويبلغُ محيطُ الحلقةِ الكبيرةِ لمسرِّعِ الجسيماتِ (Tevatron ring)، حوالي 6.68 km. وتمثِّلُ الحلقةُ الصغيرةُ (أعلى اليسارِ) المسرِّعَ الجديدَ، وهو المحقنُ الرئيسُ.

الجدول 12-3 تفاعلاتُ الحصولِ على عناصرِ ما بعدَ اليورانيومِ

العددُ الذريُّ	الاسم	الرمز	التفاعلُ النوويُّ
93	نبتونيوم	Np	$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U$ $^{239}_{92}U \rightarrow ^{239}_{93}Np + ^{0}_{-1}\beta$
94	بلوتونيوم	Pu	$^{238}_{92}Np \rightarrow ^{238}_{94}Pu + ^{0}_{-1}\beta$
95	أمريكيوم	Am	$^{239}_{94}Pu + 2^{1}_{0}n \rightarrow ^{241}_{95}Am + ^{0}_{-1}\beta$
96	كيوريوم	Cm	$^{239}_{94}Pu + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{242}_{96}Cm + ^{1}_{0}n$
97	بيركيليوم	Bk	$^{241}_{95}Am + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{243}_{97}Bk + 2^{1}_{0}n$
98	كاليفورنيوم	Cf	$^{242}_{96}Cm + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{245}_{98}Cf + ^{1}_{0}n$
99	أينشتانيوم	Es	$^{238}_{92}U + 15^{1}_{0}n \rightarrow ^{253}_{99}Es + 7\,^{0}_{-1}\beta$
100	فيرميوم	Fm	$^{238}_{92}U + 17^{1}_{0}n \rightarrow ^{255}_{100}Fm + 8\,^{0}_{-1}\beta$
101	مندليفيوم	Md	$^{253}_{99}Es + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{256}_{101}Md + ^{1}_{0}n$
102	نوبليوم	No	$^{246}_{96}Cm + ^{12}_{6}C \rightarrow ^{254}_{102}No + 4^{1}_{0}n$
103	لورنسيوم	Lr	$^{252}_{98}Cf + ^{10}_{5}B \rightarrow ^{258}_{103}Lr + 4^{1}_{0}n$

الشكل 12-10 ملأتِ التحوُّلاتُ النوويَّةُ الاصطناعيَّةُ فراغاتٍ في الجدولِ الدوريِّ (المربَّعاتِ الحمراءَ)، وكذلكَ أضافتْ إلى الجدولِ الدوريِّ عناصرَ ما بعدَ اليورانيومِ (المربَّعاتِ الزرقاءَ).

النويداتُ المشعَّةُ الاصطناعيَّةُ

تمَّ إنتاجُ جميعِ النظائرِ المشعَّةِ للعناصرِ الطبيعيَّةِ بطريقةِ التحوُّلِ النوويِّ الاصطناعيِّ. بالإضافةِ إلى ذلك، فقد ملأَ إنتاجُ كلٍّ من التكنيتيومِ والبروميثيوم صناعيًّا الفراغاتِ الموجودةَ في الجدولِ الدوريِّ، وتظهرُ مواقعُها في الشكلِ 12-10.

تُستخدمُ طريقةُ التحوُّلِ النوويِّ الاصطناعيِّ أيضًا لإنتاجِ **عناصرَ ما بعدَ اليورانيوم transuranium elements**، ***وهي العناصرُ التي تحتوي على أكثرَ من 92 بروتونًا في أنويتِها***. جميعُ هذه العناصرِ مشعَّةٌ. وتظهرُ التفاعلاتُ النوويَّةُ لتركيبِ معظمِ عناصرِ ما بعدَ اليورانيوم في الجدولِ 12-3. حاليًّا أعطيَتْ أسماءٌ لـ 17 عنصرًا من عناصرِ ما بعدَ اليورانيوم محضَّرةٍ صناعيًّا. وقد أُعلنَ عن ستَّةِ عناصرَ أخرى، ولكنها لم تؤكَّدْ تمامًا. وتظهرُ مواقعُ عناصرِ ما بعدَ اليورانيومِ في الجدولِ الدوريِّ، في الشكلِ 12-10.

مراجعةُ القسم 12-2

1. عرِّفِ الانحلالَ الإشعاعيَّ.

2. أ. ما الأنواعُ المختلفةُ للانحلالاتِ الإشعاعيَّةِ الشائعةِ؟

ب. عدِّدْ أنواعَ الانحلالِ الإشعاعيِّ التي تتحوَّلُ بموجبِها نُوَيدةٌ إلى نوَيْدةٍ أخرى.

3. متى تنتهي سلسلةُ الانحلالِ؟

تفكيرٌ ناقد

4. **تفسيرُ مفاهيم:** ميِّزْ بينَ النوَيْداتِ المشعَّةِ الطبيعيَّةِ، والاصطناعيَّةِ.

القسم 12-3

مؤشّرات الأداء

- يقارنُ بينَ جُسيماتِ ألفا وجُسيماتِ بيتّا وأشعَّةِ جاما، من حيث قدرةُ الاختراقِ ومتطلّباتُ الحجبِ.
- يوضحُ المقصود بـ «رونتجن» و «رِم» ويميِّزُ بينهما.
- يصفُ ثلاثةَ أجهزةٍ تُستعملُ للكشفِ عن الإشعاعِ.
- يوضحُ تطبيقاتِ النَويداتِ الإشعاعيَّةِ.

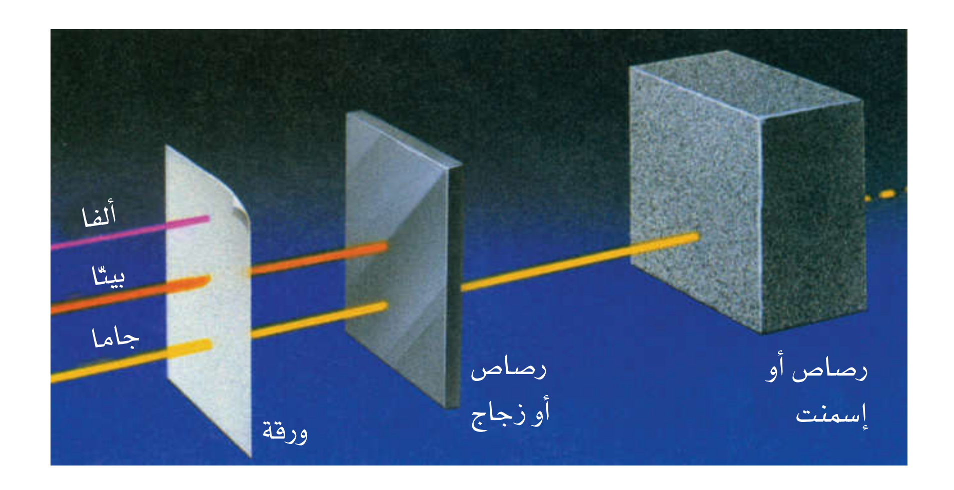
الإشعاعُ النوويُّ

في تجربةِ بيكريل اخترقَ الإشعاعُ النوويُّ المنبعثُ من اليورانيومِ الغطاءَ غيرَ المنفذِ للضوءِ، وأثَّرَ في اللوحِ الحسّاسِ تحته. للأنواعِ المختلفةِ من الإشعاعِ النوويِّ قدراتُ اختراقٍ مختلفةٌ. يشملُ الإشعاعُ النوويُّ جسيماتِ ألفا، وجسيماتِ بيتّا، وأشعَّةِ جاما.

تخترقُ جسيماتُ ألفا بضعةَ سنتيمتراتٍ من الهواءِ فقط، ولها قدرةُ اختراقٍ ضعيفةٌ، بسببِ كتلتِها وشحنتِها الكبيرتَيْن. وهي بذلك لا تستطيعُ أن تخترقَ الجلدَ لكنَّها تسبِّبُ أضرارًا إذا ابتُلِعَتْ أو استُنشِقَت. جُسيماتُ بيتّا إلكتروناتٌ تنطلقُ بسرعةٍ تقاربُ سرعةَ الضوءِ، ولها قدرةُ اختراقٍ تفوقُ 100 مرَّةٍ قدرةَ جُسيمِ ألفا. بإمكانِ جسَيمِ بيتّا اختراقُ عدَّةِ أمتارٍ من الهواءِ. أما أشعَّةُ جاما فلها قدرةُ الاختراقِ الأكبرُ. ويظهرُ الشكلُ 12-11 قدراتِ اختراقِ الأنواعِ المختلفةِ من الإشعاعِ النوويِّ ومتطلّباتِ حجبِه.

التعرُّضُ الإشعاعيُّ وآثارُه

يتمكَّنُ الإشعاعُ النوويُّ من نقلِ طاقةِ الانحلالِ النوويِّ إلى إلكتروناتِ الذرّاتِ، أو الجزيئاتِ، مسبِّبًا تأيُّنَها. والرونتجن (R) roentgen ***وحدةٌ لقياسِ التعرُّضِ الإشعاعيِّ، وهي تساوي كمّيَّةَ أشعَّةِ جاما، أو أشعَّةِ X التي تنتجُ 2×10^9 زوجٍ من الأيوناتِ لدى اختراقِها $1\ cm^3$ من الهواءِ الجافِّ.*** يسبِّبُ التأيُّنُ ضررًا للأنسجةِ الحيَّةِ. ويقاسُ ضررُ هذا الإشعاعِ الذي يصيبُ الأنسجةَ البشريَّةَ بالرمِّ. فالرمُّ **rem** *(roentgen equivalent man)* ***وحدةٌ لقياسِ كمّيَّةِ الإشعاعِ المؤيِّنِ الذي يحدثُ تدميرًا للأنسجةِ البشريَّةِ مساويًا لما يحدثُه 1 رونتجن من أشعةِ X عاليةِ الجهدِ.*** يسبِّبُ التعرُّضُ للإشعاعِ المؤيِّنِ لفترةٍ طويلةٍ طفراتٍ في الحمضِ النوويِّ للخلايا والإصابةِ بالسرطانِ، وغيرِ ذلك من التشوُّهاتِ الوراثيَّةِ. حيثُ يمكنُ أن يتحوَّلَ DNA لدى تعرُّضِه بصورةٍ مباشرةٍ للإشعاعِ، أو غيرِ مباشرةٍ، لجزيئاتٍ متأيِّنةٍ بفعلِ الإشعاعِ.



الشكل 12-11 تحتاج قدراتُ الاختراقِ المختلفةُ لجسَيماتِ ألفا، وجسَيماتِ بيتّا، وأشعَّةِ جاما، إلى مستوياتِ حجبٍ مختلفةٍ. فجسَيماتُ ألفا يمكنُ حجبُها بقطعةٍ رقيقةٍ من الورقِ. وتحتاجُ إلى الرصاصِ أو الزجاجِ لحجبِ جسَيماتِ بيتّا. أما أشعَّةُ جاما، وهي الأكثرُ اختراقًا، فتُحجبُ بواسطةِ طبقاتٍ سميكةٍ من الرصاصِ أو الخرسانةِ أو الاثنينِ معًا.

يتعرَّضُ الناسُ جميعًا لإشعاعاتٍ في البيئةِ المحيطةِ. لكن يتفاوتُ التعرُّضُ الإشعاعيُّ بينَ الأفرادِ. وتبلغُ جرعةُ التعرُّضِ القصوى المسموحةُ (maximum permisable dose) للفردِ حوالي 0.5 rem في السنةِ. بينما يزدادُ مستوى تعرُّض ملاّحي الطائراتِ وطواقمِ الخطوطِ الجوّيَّةِ، وساكني المرتفعاتِ العاليةِ، لزيادة مستوياتِ الأشعَّةِ الكونيَّةِ في الارتفاعاتِ العاليةِ. يسبِّبُ الرادون-222 المحصورُ داخلَ المباني زيادةً في التعرُّضِ الإشعاعيِّ كذلك. وبما أنه غازٌ، فإنه ينبعثُ من صخورٍ معيَّنةٍ، ومن التربةِ إلى داخلِ البيوتِ وينتقلُ صعودًا عبرَ الثقوبِ الحاصلةِ في الأساساتِ. يزيدُ الرادونُ المحصورُ داخلَ المباني والبيوتِ من خطرِ الإصابةِ بسرطانِ الرئةِ، ولا سيما بينَ المدخّنين.

الكشفُ الإشعاعيُّ

الشاراتُ الفيلميَّةُ film Badges، وعدّاداتُ جايجر-مولر Geiger-Müller counters والعدّاداتُ الوميضيَّةُ scintillation counters، هي الأجهزةُ الثلاثةُ الأكثرُ شيوعًا في كشفِ الأشعَّةِ وقياسِها. يبيِّنُ الشكلُ 12-12 شارةً فيلميَّةً وعدّادَ جايجر. وكما ذُكرَ سابقًا فإن الفيلمَ الحسّاسَ يتعرَّضُ للإشعاعِ النوويِّ كتعرُّضِهِ للضوءِ العاديِّ، وهذا هو مبدأُ **الشاراتِ الفيلميَّةِ film badges** ***التي تعتمدُ تعريضَ فيلمٍ حسّاسٍ لقياسِ التعرُّضِ الإشعاعيِّ التقريبيِّ للأشخاصِ العاملينَ في حقلِ الإشعاعاتِ.*** أمّا **عدّاداتُ جايجر-مولر Geiger-Müller counters** ***فتكشفُ عن الإشعاعِ من خلالِ حسابِ الإشاراتِ الكهربائيَّةِ المتكوِّنةِ في غازٍ مؤيَّنٍ بفعلِ الإشعاعِ.*** تُستخدمُ عدّاداتُ جايجر-مولر في الكشفِ عن جسَيماتِ بيتّا، وأشعَةِ X، وأشعَّةِ جاما. ويمكنُ الكشفُ عن الإشعاعِ أيضًا عندَ انتقالِ طاقتِهِ إلى الموادِّ الوميضيَّةِ، أو الباعثةِ للضوءِ المرئيِّ لدى امتصاصِها الإشعاعَ المؤيِّنَ. **العدّاداتُ الوميضيَّةُ scintillation counters** ***أجهزةٌ تحوِّلُ الضوءَ الوميضيَّ إلى إشارةٍ كهربائيَّةٍ للكشفِ عن الإشعاعِ.***

الشكل 12-12 (أ) شارةٌ فيلميَّةٌ (ب) عدّادُ جايجر-مولر. أجهزةٌ تُستعملُ للكشفِ عن الإشعاعِ النوويِّ.

(أ)

(ب)

تطبيقاتُ الإشعاعِ النوويِّ

هناكَ تطبيقاتٌ متعددةٌ للإشعاعِ النوويِّ، مبنيَّةٌ على حقيقةِ أن الخصائصَ الفيزيائيَّةَ والكيميائيَّةَ للنظائرِ المستقرَّةِ هي، في الأساسِ، خصائصُ النظائرِ المشعَّةِ نفسِها للعنصرِ الواحدِ. وفيما يلي عرضٌ لبعضِ تطبيقاتِ النوَيداتِ المشعَّةِ.

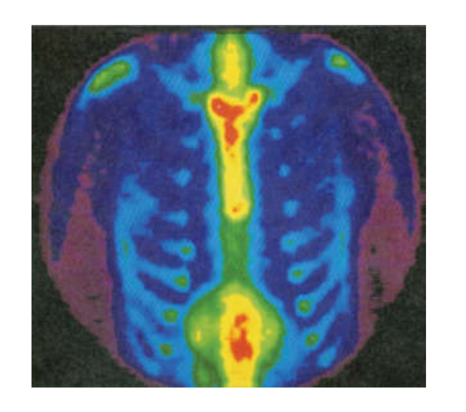
التأريخُ بالإشعاعِ

إن التأريخَ بالإشعاعِ **radioactive dating** ***طريقةٌ يحدَّدُ بها العمرُ التقريبيُّ لجسَيمٍ ما، بالاعتمادِ على كمّيَّةِ النوَيداتِ المشعَّةِ الموجودةِ فيه.*** يعتمدُ مثلُ هذا التقديرِ للعمرِ التقريبيِّ على حقيقةِ أن الموادَّ المشعَّةَ تنحلُّ بأعمارِ نصفٍ معلومةٍ. كذلكَ يقدَّرُ العمرُ بقياسِ تراكمِ النوَيداتِ الوليدةِ، أو اختفاءِ النوَيداتِ الأمِّ.

الكربونُ–14 نظيرٌ مشعٌّ له عمرُ نصفٍ يقتربُ من 5715 سنةً. لذلك يمكنُ استعمالُه لتقديرِ أعمارِ الموادِّ العضويَّةِ حتى 50 000 سنةٍ تقريبًا. تستعملُ النوَيداتُ ذاتُ أعمارِ النصفِ الأطولِ لتقديرِ أعمارِ الأشياءِ التي تزيدُ أعمارُها على 50 000 سنةٍ. وتستخدمُ طرائقُ أخرى نويداتٍ ذاتَ أعمارِ نصفٍ طويلةٍ جدًّا لتأريخِ أعمارِ معادنَ وصخورٍ من القمرِ تزيدُ على 4 ملياراتِ سنةٍ.

النويداتُ المشعَّةُ في الطبِّ

تُستعملُ النوَيداتُ المشعَّةُ، ولا سيما النويدةَ الصناعيَّةَ المشعَّةَ كوبالت–60 في الطبِّ، للقضاءِ على أنواعٍ معيَّنةٍ من الخلايا السرطانيَّةِ. كذلك تُستعملُ أنواعٌ من النوَيداتِ المشعَّةِ **كمتتبِّعٍ مشعٍّ radioactive tracer**، ***وهي ذراتٌ مشعَّةٌ يتمُّ إدخالُها في موادَّ، لكي يتسنى تتبُّعُ حركتِها.*** يستعملُ التتبُّعُ الإشعاعيُّ لتشخيصِ الأورامِ السرطانيَّةِ وأنواعٍ أخرى من الأمراضِ. تأمَّلِ الشكلَ 12-13.



الشكل 12-13 يمكنُ استخدامُ النوَيداتِ المشعَّةِ، كالتكنيتيوم–99، للكشفِ عن سرطانِ العظمِ. في هذه التقنيَّةِ يتجمَّعُ التكنيتيومُ–99 في مكانِ الأيضِ العظميِّ غيرِ السويِّ. يمكنُ عندئذٍ تحديدُ مكانِ سرطانِ العظمِ، بالكشفِ عن الإشعاعِ النوويِّ.

النوَيداتُ المشعَّةُ في الزراعةِ

في المجالِ الزراعيِّ، تُستعملُ نوَيداتُ تتبُّعٍ مشعَّةٌ في السمادِ لتحديدِ فاعليَّةِ الأسمدةِ. تشيرُ كمّيَّةُ المتتبِّعِ الإشعاعيِّ التي يمتصُّها النباتُ إلى كمّيَّةِ السمادِ الممتصِّ. ويُستخدمُ الإشعاعُ النوويُّ أيضًا لإطالةِ عمرِ الأطعمةِ المعروضةِ في الأسواقِ. كأن تُستخدمَ أشعَّةُ جاما المنبعثةُ من الكوبالتِ–60، لقتلِ البكتيريا والحشراتِ التي تتلفُ الطعامَ.

النفاياتُ النوويَّةُ

الانشطارُ النوويُّ والاندماجُ النوويُّ

في الانشطارِ النوويِّ تنقسمُ النواةُ في الذرّاتِ الثقيلةِ، كاليورانيوم، إلى نواتَيْن أو أكثرَ، من الأنويةِ الأخفِّ. وتشملُ نواتجُ الانشطارِ النوويِّ الأنويةَ بالإضافةِ إلى النويداتِ المتكوِّنةِ من شظايا النشاطِ الإشعاعيِّ. الانشطارُ هو العمليَّةُ الأوَّليَّةُ للوقودِ النوويِّ في المُفاعلاتِ النوويَّةِ التي تسيِّرُ الغوّاصاتِ الذرّيَّةَ وحاملاتِ الطائراتِ. في حين أن الاندماجَ النوويَّ هو

العمليَّةُ المعاكسةُ للانشطارِ النوويِّ، وفيه تُستخدمُ درجاتُ الحرارةِ والضغطُ المرتفعان لدمجِ الذرّاتِ الخفيفةِ، كالهيدروجينِ، وذلك لتكوينِ ذرّاتٍ أثقلَ، كالهيليوم. ويمثِّلُ الاندماجُ النوويُّ مصدرَ طاقةِ الشمسِ والنجوم. تعدُّ عمليَّةُ إحداثِ تفاعلاتِ الاندماجِ واستمرارُها أكثرَ تعقيدًا وكلفةً من عمليَّةِ تنفيذِ الانشطارِ النوويِّ. إن كلاًّ من الانشطارِ والاندماجِ النوويَّيْن يُطلقُ كمّيّاتٍ هائلةً من الطاقةِ، يمكنُ تحويلُها إلى طاقةٍ حراريَّةٍ، أو كهربائيَّةٍ. وكلتا العمليَّتَيْن تُنتجانِ أيضًا **نفاياتٍ نوويَّةً nuclear waste**. غيرَ أنَّ عمليَّةَ الانشطارِ تُنتجُ نفاياتٍ أكثرَ من عمليَّةِ الاندماجِ. والسؤالُ الذي يطرحُ نفسَهُ هو كيف نتحكَّمُ بهذه النفاياتِ ونخزِّنها ونتصرَّفُ بها.

التخلُّصُ من النفاياتِ النوويَّةِ

لكلِّ مادَّةٍ مشعَّةٍ عمرُ نصفٍ خاصٌّ بها، وهو الزمنُ اللازمُ لنصفِ تلكَ المادَّةِ لكي ينحلَّ. فالنفاياتُ المشعَّةُ الناتجةُ عن الاستعمالاتِ الطبّيَّةِ مثلاً، لها في الأغلبِ أعمارُ نصفٍ من عدَّةِ أشهرٍ أو أقلَّ، بينما تستغرقُ بعضُ النفاياتِ النوويَّةِ في المفاعلاتِ النوويَّةِ آلافَ السنينَ لكي تنحلَّ. ويلزمُ التخلُّصُ من النفاياتِ النوويَّةِ بطريقةٍ تحجبُ إشعاعاتِها عن الكائناتِ الحيَّةِ. وهنالك نوعان للتخلُّصِ من النفاياتِ، هما: التخلُّصُ منها في الموقعِ بتخزينِها فيه، أو التخلُّصُ منها خارجَ الموقعِ.

تخزينُ النفاياتِ النوويَّةِ

تُعدُّ قضبانُ الوقودِ المستهلَكِ إحدى أهمِّ النفاياتِ الشائعةِ في المفاعلاتِ النوويَّةِ. يمكنُ تخزينُ قضبانِ الوقودِ هذه فوقَ سطحِ الأرضِ بغمرِها في أحواضِ ماءٍ، أو في حاوياتٍ جافَّةٍ. وعندَما تمتلئُ الأحواضُ، تُنقلُ القضبانُ إلى حاوياتٍ جافَّةٍ تُصنَّعُ عادةً من خرساناتٍ فولاذيَّةٍ. يقصدُ بكلٍّ من طريقتَي التخزينِ (الأحواضِ والحاوياتِ الجافَّةِ) التخزينَ المؤقَّتَ قبلَ أن يتمَّ نقلُ النفاياتِ إلى مواقعِ التخزينِ الدائمةِ تحتَ الأرضِ.

مراجعةُ القسم 3-12

1. ماذا يلزمُ لحجبِ جَسيماتِ ألفا؟ لماذا تكونُ هذه الموادُّ فعّالةً؟
2. ما الجهازُ المستخدمُ لقياسِ مستوى التعرُّضِ الإشعاعيِّ لدى العاملينَ في حقلِ الإشعاعِ؟
3. فسِّرْ سببَ استخدامِ الإشعاعِ النوويِّ في مجالِ حفظِ الغذاءِ.

تفكيرٌ ناقد

4. **استنتاجٌ استدلالي:** وضِّحْ كيفيَّةَ التخلُّصِ من النفاياتِ النوويَّةِ، وكيفَ تؤثِّرُ كلُّ طريقةٍ من هذه الطرقِ في البيئةِ وفي المحيطِ.

القسم 4-12

مؤشِّراتُ الأداءِ

- يُعرِّفُ الانشطارَ النوويَّ، والتفاعلَ المتسلسلَ، والاندماجَ النوويَّ، ويميِّزُ بينَها.
- يفسِّرُ كيفَ يستعملُ تفاعلَ الانشطارِ لإنتاجِ الطاقةِ.
- يوضحُ الفوائدَ الممكنةَ، والصعوباتِ العمليَّةَ لضبطِ تفاعلاتِ الانشطارِ.

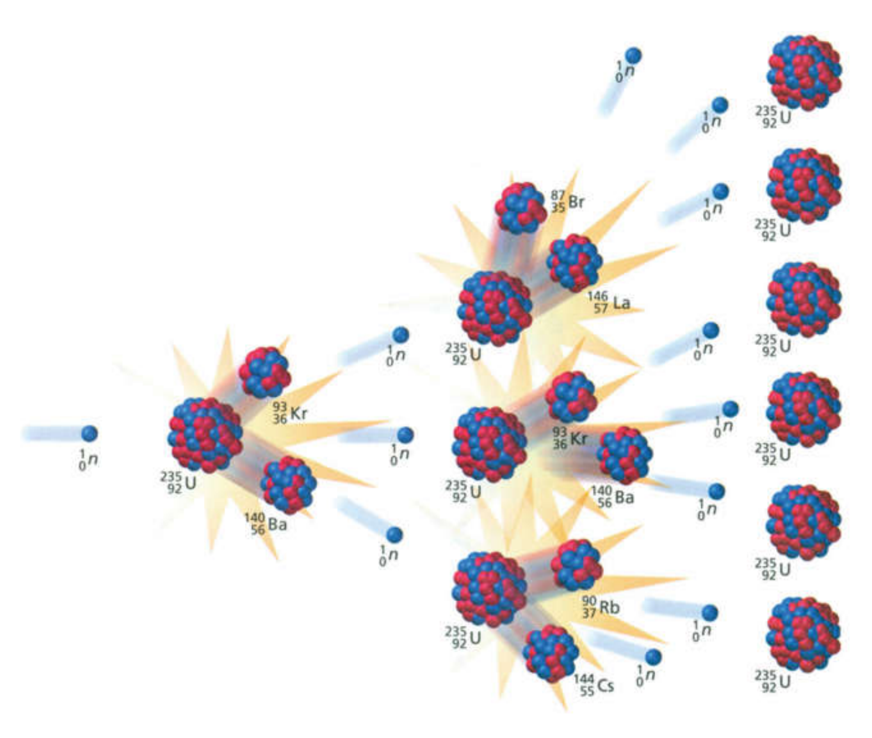
الانشطارُ النوويُّ والاندماجُ النوويُّ

الانشطارُ النوويُّ

تأمَّلِ الشكلَ 12-1 الذي يبيِّنُ أن الأنويةَ ذاتَ الكتلِ المتوسِّطةِ هي الأكثرُ استقرارًا. ***بينَما تنشطرُ الأنويةُ الثقيلةُ إلى أنويةٍ أكثرَ استقرارًا من ذواتِ الكتلِ المتوسِّطةِ. تُسمّى هذه العمليَّةُ التي تحرِّرُ كمِّيَاتٍ كبيرةً من الطاقةِ بالانشطارِ النوويِّ*** **nuclear fission**. يحصلُ الانشطارُ النوويُّ تلقائيًّا، أو لدى تعرُّضِ الأنويةِ لقصفِ جُسَيماتٍ مباشرٍ. فلدى قصفِ اليورانيوم-235 بنيوتروناتٍ بطيئةٍ، قد تأسرُ نواةُ اليورانيوم أحدَ هذه النيوتروناتِ، فتصبحُ غيرَ مستقرَّةٍ، وتنقسمُ إلى أنويةٍ متوسِّطةِ الكتلةِ مع إطلاقِ نيوتروناتٍ. تكونُ كتلةُ النواتجِ أقلَّ من كتلةِ المتفاعلاتِ، حيثُ تتحوَّلُ الكتلةُ المفقودةُ إلى طاقةٍ.

التفاعلُ النوويُّ المتسلسلُ

يحصلُ التفاعلُ المتسلسلُ عندَما تُنتجُ الذرَّةُ المنشطرةُ بفعلِ النيوتروناتِ القاصفةِ لنواتِها، نيوتروناتٍ أكثرَ. **فالتفاعلُ المتسلسلُ chain reaction** ***هو التفاعلُ الذي تكونُ فيه المادَّةُ التي يبدأُ التفاعلُ بها، هي أيضًا أحدُ النواتجِ، والتي يمكنُها أن تبدأَ تفاعلاً جديدًا.*** وكما هو مبيَّنٌ في الشكل 12-14، ينطلقُ نيوترونانِ أو ثلاثةٌ لدى انشطارِ اليورانيوم-235. تسبِّبُ هذه النيوتروناتُ انشطارَ أنويةِ يورانيوم-235 أخرى. ومرَّةً ثانيةً تنطلقُ نيوتروناتٌ من أنويةِ الذرّاتِ المنشطرةِ، وهكذا.



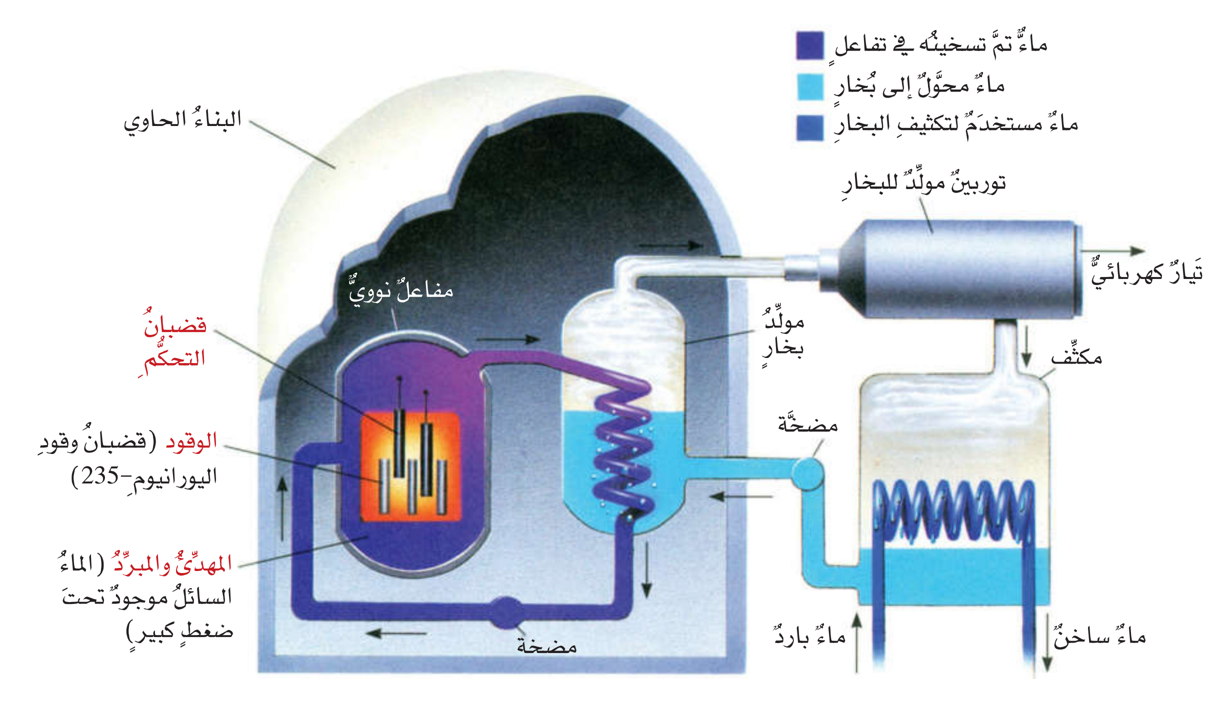
الشكل 12-14 إحداثُ انشطارِ اليورانيوم-235 لدى قصفِ ذرَّتِه بنيوتروناتٍ، يؤدّي إلى تفاعلٍ متسلسلٍ في حالِ توفرِ الكتلةِ الحرجةِ لليورانيومِ-235.

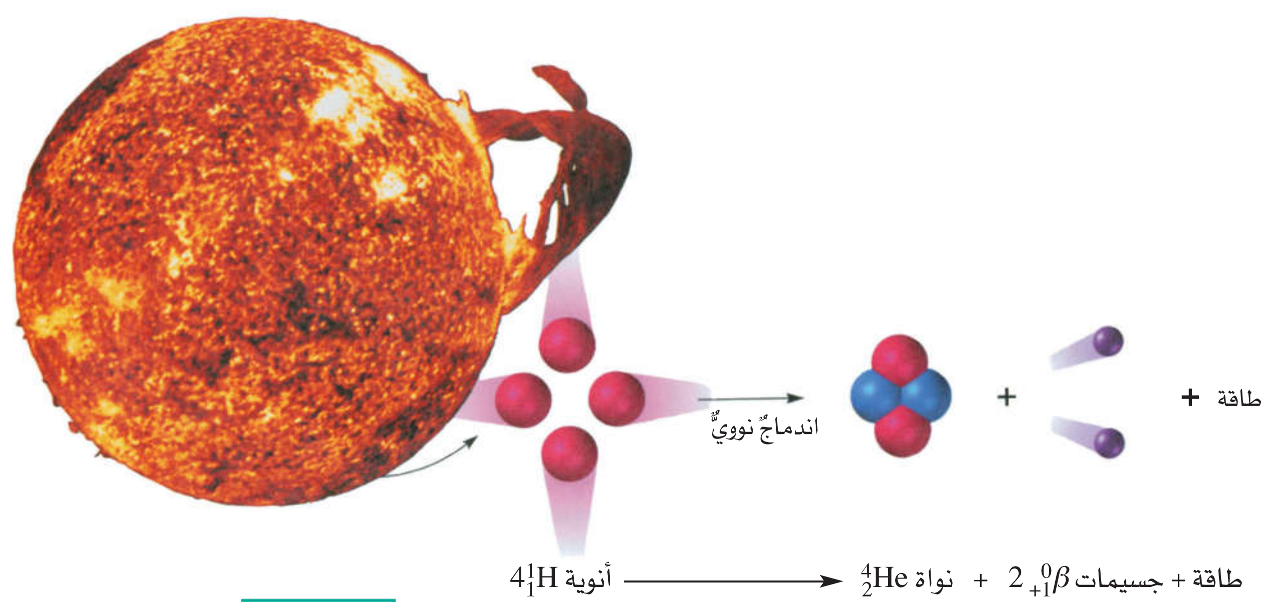
يستمرُّ هذا التفاعلُ المتسلسلُ، حتّى تنشطرَ ذرّاتُ اليورانيوم-235 كافّةً أو عندَما تُخفقُ النيوتروناتُ في قصفِ أنويةِ هذهِ الذرّاتِ. إذا كانَتْ كتلةُ عيّنةِ اليورانيوم-235 تحتَ حدٍّ معيَّنٍ فسوفَ تتناثرُ النيوتروناتُ متباعدةً، دونَ أن تقصفَ الأنويةَ. وبذلك يتوقَّفُ التفاعلُ المتسلسلُ. ***الحدُّ الأدنى لكمّيَّةِ النويداتِ التي توفّرُ العددَ اللازمَ من النيوترونات، لاستمرار التفاعل المتسلسل، يسمّى الكتلةَ الحرجةَ critical mass***. وتزوِّدُ التفاعلاتُ المتسلسلةُ غيرُ المسيطرِ عليها القنابلَ النوويَّةَ بالطاقةِ التفجيريَّةِ. ***وتستخدمُ المفاعلاتُ النوويَّةُ nuclear reactors التفاعلاتِ المتسلسلةَ للانشطاراتِ المسيطرِ عليها لإنتاجِ الطاقةِ والنويداتِ المشعَّة.***

محطّاتُ توليدِ الطاقةِ النوويَّةِ

تستخدمُ محطّاتُ توليدِ الطاقةِ النوويَّةِ nuclear power plants الطاقةَ الحراريةَ من المفاعلاتِ النوويَّةِ لإنتاجِ الطاقةِ الكهربائيَّة. لهذه المحطّاتِ مكوِّناتٌ خمسةٌ هي: واقي الإشعاعِ، والوقودُ، وقضبانُ التحكُّمِ، والمهدّئُ، والمبرِّدُ. ويمكنُ ملاحظةُ هذه المكوِّناتِ في الشكل 12-15، حيث تحاطُ جميعًا بواقي الإشعاعِ. يتكوَّنُ **واقي الإشعاع shielding** ***من مادَّةٍ ماصَّةٍ للأشعَّةِ، ولاسيما أشعَّةَ جاما، الصادرةَ من المتفاعلاتِ النوويَّةِ، وذلك لتقليلِ التعرُّضِ لهذه الأشعَّةِ.*** يستخدمُ اليورانيومُ-235 عادةً كوقودٍ انشطاريٍّ لإنتاجِ الطاقةِ الحراريَّةِ التي يمتصُّها المبرِّدُ. أما **قضبانُ التحكُّمِ control rods** ***فهي قضبانٌ ماصَّةٌ للنيوترونات تساهمُ في السيطرةِ على التفاعلِ من خلالِ تقليلِ عددِ النيوتروناتِ الحرَّةِ.*** وبما أن انشطارَ اليورانيوم-235 يتمُّ بكفاءةٍ كبيرةٍ بالنيوتروناتِ البطيئةِ **فإنَّ المهدّئَ moderator** ***يستخدمُ لإضعافِ حركةِ النيوتروناتِ السريعةِ الناتجةِ عن الانشطارِ النوويِّ.*** وتتمكَّنُ محطّاتُ توليدِ الطاقةِ النوويَّةِ من توفيرِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ بأسعارٍ تنافسيَّةٍ، دونَ إنتاجِ غازاتِ الدفيئةِ أو جسيماتٍ ملوَّثةٍ. ومما يستوجبُ التنبُّهَ إليه حولَ الطاقةِ النوويَّةِ واستخداماتها مسألةُ تخزينِ ما تبقّى من الوقودِ المشعِّ.

الشكل 12-15 في هذا النموذجِ لمحطَّةِ توليدِ الطاقةِ النوويَّةِ، يتمُّ تسخينُ الماءِ المضغوطِ بواسطةِ الطاقةِ الناتجةِ عن انشطارِ اليورانيوم-235. يتمُّ تدويرُ هذا الماءِ وتحويلُه إلى بخارٍ في مولِّدٍ بخاريٍّ. يدفعُ البخارُ توربينًا كبيرًا لإنتاجِ الكهرباءِ، ثمَ يُستخدمُ ماءٌ باردٌ من بحيرةٍ أو نهرٍ قريبٍ، لتكثيفِ البخارِ وتحويلِه إلى ماءٍ. وقد يعادُ تبريدُ الماءِ الساخنِ الذي أنتجَه المكثِّفُ في أبراجِ تبريدٍ خاصَّةٍ، قبلَ أن يعادَ استخدامُه أو إرجاعُه إلى النهرِ أو البحيرةِ التي أُخذَ منها.





الشكل 12-16 إن اندماجَ أنويةِ الهيدروجين لتكوين أنويةِ الهيليوم الأكثر استقرارًا، هو مصدرُ طاقةِ شمسِنا وبقيَّةِ النجوم.

الاندماجُ النوويُّ

يمكنُ أيضًا استخدامُ الاستقراريَّةِ العاليةِ للأنويةِ ذاتِ الكتلِ المتوسِّطةِ، في تفسيرِ عمليَّةِ الاندماج. في **الاندماجِ النوويِّ nuclear fusion** ***تتحدُ الأنويةُ ذاتُ الكتلِ الخفيفةِ لتكوينِ أنويةٍ أثقلَ وأكثرَ استقرارًا***. يطلقُ الاندماجُ النوويُّ طاقةً أكبرَ من طاقةِ الانشطارِ في جرامٍ واحدٍ من الوقودِ النوويِّ. وفي حالةِ الشمسِ والنجومِ المشابهةِ لها، تتحدُ أنويةُ الهيدروجينِ عندَ درجةِ حرارةٍ وضغطٍ مرتفعَيْنِ جدًّا لتكوينِ أنويةِ الهيليوم مع فقدانٍ للكتلةِ وإطلاقِ طاقةٍ. التفاعلُ النهائيُّ للاندماجِ ممثَّلٌ في الشكل 12-16.

يمكنُ استخدامُ تفاعلاتِ الاندماجِ النوويِّ المسيطرِ عليها في توليدِ الطاقةِ. ويطوِّرُ الباحثونَ حاليًّا طرقًا لاحتواءِ البلازما المتفاعلةِ اللازمةِ للاندماجِ. والبلازما خليطٌ من أنويةٍ موجبةٍ وإلكتروناتٍ، عندَ درجةِ حرارةٍ مرتفعةٍ جدًّا. ولا توجدُ مادَّةٌ معروفةٌ لها القدرةُ على تحمُّلِ الحرارةِ الابتدائيَّةِ لتكوينِ البلازما، والبالغةِ 10^8 K. ويستخدمُ العلماءُ حقولاً مغنطيسيَّةً قويَّةً لتعليقِ البلازما المشحونةِ داخلَ حاويةٍ، ولكن بعيدًا عن جدرانِها. ومع ذلك، تبقى الحاجةُ قائمةً إلى كمّيَّةٍ هائلةٍ من الطاقةِ لبدءِ تفاعلِ الاندماجِ. ولكي يصبحَ الاندماجُ النوويُّ مصدرًا عمليًّا للطاقةِ، نحتاجُ إلى مزيدٍ من الطاقةِ يتمُّ توليدُها من التفاعلِ، وليسَ العكسَ.

مراجعةُ القسمِ 12-4

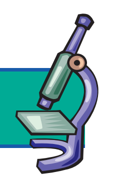
1. ميِّزْ بينَ الانشطارِ النوويِّ والاندماجِ النوويِّ.

2. عرِّفِ التفاعلَ المتسلسلَ.

3. اذكرِ المكوِّناتِ الخمسةَ لمفاعلٍ نوويٍّ.

تفكيرٌ ناقد

4. ربطُ أفكار: وضِّحْ سببَ اعتبارِ الاندماجِ النوويِّ كأحدِ أهمِّ مصادرِ الطاقةِ لدينا.



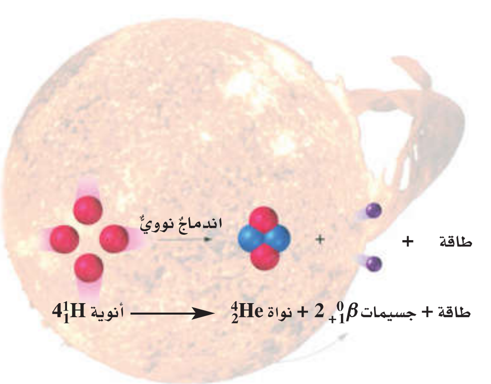
قراءةٌ علميَّةٌ

الشمسُ لغزٌ محيِّرٌ... واندماجاتٌ نوويَّةٌ بنَّاءةٌ

يقولُ تباركَ وتعالى: «وَالشَّمْسُ تَجْرِي لِمُسْتَقَرٍّ لَهَا ذَٰلِكَ تَقْدِيرُ الْعَزِيزِ الْعَلِيمِ»، سورةُ يس، الآيةُ 38. لقد اعتقدَ العلماءُ في القرنِ الماضي أن الشمسَ هي مركزُ الكونِ وأنها ثابتةٌ في حجمِها وكتلتِها ومكانِها، وأن كلَّ شيءٍ يتحرَّكُ حولَها، واعتقدوا ببقاءِ المادَّةِ وعدمِ نفاذِها، واعتقدوا أن للمادَّةِ دوراتٍ وللزمانِ دوراتٍ فلا ينتهيان، ولكن تأتي هذه الآيةُ لتبيِّنَ بهذا النصِّ المعجزِ منذ 14 قرنًا من الزمانِ، أن ما يجري لكلِّ شيءٍ في الكونِ يجري على الشمس وعلى المادَّةِ وعلى الزمانِ أيضًا. فالشمسُ تجري وتتحرَّكُ وتهوي في هذا الكونِ السحيقِ، وهي تتوهَّجُ الآن ثم سوف تخبو وتستقرُّ بعد حين. فالشمسُ تتناقصُ حجمًا ووزنًا حتى تستقرَّ وتتلاشى بعد حين.

والشمسُ وهي تجري، أيضًا، فإنه يجري معها أعضاءُ مجموعتِها المرتبطة بها من الكواكبِ، وكذلك فالشمسُ تدورُ حولَ نفسِها وتديرُنا حولَها، فهي تجري وكواكبُها يجرون من حولِها إلى أن تستقرَّ حركتُها فيستقرّون معها، وهذا ما أكَّدَه العلمُ الحديثُ في مشاهداتِه الفعليَّة، وأرضُنا التي نعيشُ عليها ليستْ إلا كوكبًا من كواكبِ المجموعةِ الشمسيَّةِ التي تجري في ركبِ الشمسِ وتنقادُ معها وفقًا لتقديرِ الخالقِ العزيزِ العليمِ، وسوف تستقرُّ حركةُ الشمسِ بعد هذا الزمنِ، وحين تأتي هذه اللحظةُ سيتوقَّفُ الزمانُ بالنسبةِ إلى أهلِ المجموعةِ الشمسيَّةِ وسكّانِها. فللشمسِ ميقاتٌ ستستقرُّ عندَه بأمرِ خالقِها وسينتهي عندَه كلُّ شيءٍ، هذا ما أكَّدَه العلمُ وما تأتي به هذه الآيةُ من خالقِ الشمسِ، علمًا أن الشمسَ سوفَ تستقرُّ بعد هذه الجري الدؤوبِ، وقد أثبتَ العلماءُ أن الشمسَ كرةٌ من غازِ الهيدروجينِ، وتصلُ درجةُ الحرارةِ في باطنِها إلى أكثرَ من 15 مليونَ درجةٍ سيليزيَّةٍ ويحدثُ بها أعقدُ التفاعلاتِ النوويَّةِ الاندماجيَّةِ التي سوف تحوِّلُها في النهايةِ من كرةٍ متوهِّجةٍ إلى كرةٍ مستقرَّةٍ. فعندَ هذه الدرجةِ تندمجُ ذرّتا الهيدروجينِ المتوهِّجِ وتتحوَّلانِ إلى ذرَّةٍ من غازِ الهيليومِ الخاملِ، ويتحوَّلُ جزءٌ من كتلتَي ذرَّتَي الهيدروجينِ إلى طاقةٍ تزيدُ الشمسَ تأجُّجًا وتمنحُها الطاقةَ التي تبعثُها إلينا. وقد حاولَ الإنسانُ أن يحاكيَ ما يحدثُ في الشمسِ، ولكنه عجزَ عن هذا، وأدَّتْ أبحاثُه في هذا المجالِ إلى اكتشافِه للقنابلِ الهيدروجينيَّةِ التي تنتجُ كمًّا هائلاً من الطاقةِ ينشأُ عنها انفجاراتٌ مدمِّرةٌ. وهكذا لم يتمكَّنِ البشرُ إلا في استخدامِها للتدميرِ وليس لعمارةِ هذا الكونِ كما يحدثُ في شمسِنا بأمرِ اللهِ.

وقد عجزَ البشرُ حتى يومِنا هذا أن ينتجوا الطاقةَ الكهربائيَّةَ باستغلالِ تفاعلاتٍ اندماجيَّةٍ كالتي تحدثُ في الشمسِ، وكي ترسلَ الشمسُ كلَّ هذه الحرارةِ فإنها تحرقُ في كلِّ ثانيةٍ 600 مليونِ طنٍّ من مكوِّناتِها من الوقودِ الهيدروجينيِّ. وهكذا يتحوَّلُ غازُ الهيدروجينِ بعد احتراقِه أو اندماجِه إلى غازِ الهيليومِ الخاملِ باستمرارٍ وثباتٍ ودونَ توقُّفٍ، على مدى الأيامِ والقرونِ والدهورِ. وينطلقُ من الشمسِ مع هذا التحوُّلِ في كلِّ ثانيةٍ كمٌّ من الطاقةِ يكفي ما تحتاجُ إليه الأرضُ لمدَّةِ مليونِ سنةٍ كاملةٍ، ولكن هذا الكمَّ يتوزَّعُ على الكونِ بأكملِه ويكونُ نصيبُ الأرضِ من هذا الكمِّ قدرًا محدَّدًا لها يكفيها دون زيادةٍ أو نقصانٍ. وهكذا فإن الشمسَ تتغيَّرُ وتبدأُ من غازِ الهيدروجينِ الذي يجري له أو به هذا الكمُّ الهائلُ من التفاعلاتِ والاندماجاتِ، ثم ينتهي إلى كرةٍ من غازٍ ساكنٍ أو خاملٍ هو الهيليومُ، ولا يبقى لها في النهايةِ وقودٌ يقاومُ قوَّةَ جذبِ كتلةِ هذا الغازِ الخاملِ، فيتقلَّصُ نجمُ الشمسِ بتأثيرِ وزنِه، وتصيرُ الشمسُ في النهايةِ قزمًا ساكنًا أبيضَ، أو ثقبًا أسودَ في هذا الكونِ، كما حدثَ في ملايينِ النجومِ الأخرى، التي كانتْ مثلَ شمسِنا وجرى لها ما سيجري لشمسِنا بعدَ فترةٍ قدَّرَها العلماءُ بحوالي 500 مليونِ سنةٍ،



كي تتحوَّلَ إلى هذا القزمِ الساكنِ.

والآن ما الذي يحتفظُ للشمسِ بهذا الجري والتفاعلِ بهذا الثباتِ الممتدِّ عبر ملايينِ السنينِ التي نشأتْ أثناءَها الحياةُ على الأرضِ، والتي تكوَّنتْ خلالَها الأرضُ؟ إن الشمسَ لو بردَتْ بأقلِّ عددٍ من الدرجاتِ عن درجتِها الحاليَّةِ التي تقدَّرُ بملايينِ الدرجاتِ، فسيؤدي هذا إلى انخفاضِ معدّلاتِ الاحتراقِ بها إلى النصفِ، وهذا ما يؤكِّدُه العلمُ الحديثُ. وبهذا تقلُّ الطاقةُ التي تصلُ إلى الأرضِ فتتجمَّدُ الأرضُ، ولو زادَتْ بضعَ درجاتٍ لتضاعفَتْ معدَّلاتُ الاحتراقِ ولزادَتْ معها الطاقةُ التي تصلُ إلى الأرضِ فتحترقُ، أيضًا، الأرضُ. ثم إذا نظرْنا إلى الشمسِ وهي تحترقُ وتقلُّ كتلتُها بملايينِ الأطنانِ في كلِّ ثانيةٍ، فلنا أن نتعجَّبَ: هل هذا النقصُ الدائمُ في كتلةِ الشمسِ له الأثرُ على أفلاكِ الكواكبِ من حولِها؟

النظريّاتُ العلميَّةُ تؤكِّدُ أن تتأثَّرَ هذه الأفلاكُ فتبتعدُ الأرضُ عن الشمسِ. ولكن لو حدثَ هذا فستتجمَّدُ الحياةُ على الأرضِ، وهذا لم يحدثْ خلالَ الملايينِ من السنينِ التي هي عمرُ الأرضِ. لقد حارَ العلماءُ في فهمِ أسرارِ هذه الشمسِ، بحيثُ تظلُّ بهذا الثباتِ لها ولمن حولها، وجاءَ هذا النصُّ من الخالقِ أنه هو الذي قضى عليها بهذا الثباتِ، فأودعَ هذا التعبيرَ في كتابِه بأرفعِ المعاني والكلماتِ «وَالشَّمْسُ تَجْرِي لِمُسْتَقَرٍّ لَهَا ذَٰلِكَ تَقْدِيرُ الْعَزِيزِ الْعَلِيمِ»، حقًّا إنه عزيزٌ في قدرتِه وتقديرِه، عليمٌ يحيطُ بعلمِه كلَّ شيءٍ.

مراجعةُ الفصل 12

ملخّصُ الفصل

1-12

- يُسمّى الفرقُ بين مجموعِ كتلِ النويّاتِ والإلكتروناتِ في الذرّةِ وبينَ الكتلةِ الحقيقيّةِ لها بنقصِ الكتلةِ.
- يميلُ الاستقرارُ النوويُّ إلى أن يكونَ الأكبرَ، عندما تكونُ النويّاتُ مزدوجةً، وكذلك عندما يكونُ عددُ النويّاتِ عددًا سحريًّا، وعندما تكونُ النسبةُ بين النيوتروناتِ والبروتوناتِ ذاتَ قيمةٍ محدَّدةٍ.
- يمكنُ أن تتضمَّنَ التفاعلاتُ النوويَّةُ التي تتمثَّلُ بمعادلاتٍ نوويةٍ تحوُّلاً نوويًّا للنويداتِ.

المفردات

النويَّة (331) nucleon	طاقةُ الربطِ النوويِّ (332) nuclear binding energy	الأعدادُ السحريَّةُ (333) magic numbers
النوَيْدة (331) nuclide	نموذجُ الطبقةِ النوويَّة (333) nuclear shell model	التفاعلُ النوويُّ (334) nuclear reaction
نقصُ الكتلةِ (331) mass defect		التحوُّلُ النوويُّ (334) transmutation

2-12

- تصبحُ النويداتُ المشعَّةُ أكثرَ استقرارًا لدى انحلالِها إشعاعيًّا.
- إن انبعاثاتِ ألفا وبيتّا والبوزيترون وأشعَّةِ جاما، بالإضافةِ إلى الأسْرِ الإلكترونيِّ، هي أنواعٌ من الانحلالِ الإشعاعيِّ. يرتبطُ نوعُ الانحلالِ الإشعاعيِّ بمحتوياتِ النويدةِ، وكذلك بمستوى طاقةِ النواةِ.
- إن عمرَ نصفِ النوَيدَةِ المشعَّةِ هو الفترةُ التي يستغرقُها نصفُ عددِ ذرّاتِ تلك النوَيدةِ لكي ينحلَّ إشعاعيًّا.
- تُستخدَمُ التحوُّلاتُ النوويَّةُ الاصطناعيَّةُ لإنتاجِ نوَيداتٍ مشعَّةٍ اصطناعيَّةٍ، تتضمَّنُ عناصرَ ما بعدَ اليورانيوم.

المفردات

الانحلالُ الإشعاعيُّ (335) radioactive decay	أسْرُ الإلكترونِ (337) electron capture	التحوُّلُ النوويُّ الاصطناعيُّ (341) artificial transmutation
الإشعاعُ النوويُّ (335) nuclear radiation	أشعَّةُ جاما (337) gamma rays	عناصرُ ما بعدَ اليورانيوم (342) transuranium elements
النوَيدةُ المشعَّةُ (335) radioactive nuclide	عمرُ النصفِ (338) half-life	
جسَيمُ ألفا (336) alpha particle	سلسلةُ الانحلالِ (340) series decay	
جسَيمُ بيتّا (336) beta particle	النويدةُ الأمُّ (340) parent nuclide	
البوزيترون (336) positron	النويدةُ الوليدةُ (340) daughter nuclide	

3-12

- لكلٍّ من جسَيماتِ ألفا وجسَيماتِ بيتّا وأشعَّةِ جاما، قدراتُ اختراقٍ مختلفةٍ، ممّا يحتِّمُ متطلِّباتِ حجبٍ مختلفةٍ.
- تُستخدمُ الشاراتُ الفيلميَّةُ، وعدّاداتُ جايجر–موللر والعدّاداتُ الوميضيَّةُ للكشفِ عن الإشعاعِ.
- يتعرَّضُ كلٌّ منّا لإشعاعِ النويداتِ.
- للنويداتِ المشعَّةِ استخداماتٌ متعدِّدةٌ من ضمنِها التأريخُ الإشعاعيُّ، وكشفُ الأمراضِ، ومعالجتُها أيضًا.
- يجبُ احتواءُ النفاياتِ النوويَّةِ، وتخزينُها والتخلُّصُ منها بطريقةٍ تمنعُ تعرُّضَ الناسِ والبيئةِ للضررِ.

المفردات

الرونتجن (343) roentgen	عدّادُ جايجر–موللر (344) Geiger-Müller counter	التأريخُ بالإشعاعِ (345) radioactive dating
الرِم (343) rem	العدّادُ الوميضيُّ (344) scintillation counter	المتتبِّعُ المشعُّ (345) radioactive tracer
الشارةُ الفيلميَّةُ (343) film badge		النفاياتُ النوويَّةُ (346) nuclear waste

4-12

- إن كلاًّ من الانشطارِ النوويِّ والاندماجِ النوويِّ، تفاعلٌ نوويٌّ تنتجُ فيه الأنويةُ المنشطرةُ أو المندمجةُ أنويةً أكثرَ استقرارًا، وتطلقُ كمّياتٍ هائلةً من الطاقةِ.
- تنتجُ تفاعلاتُ الانشطارِ المسيطرُ عليها طاقةً ونويداتٍ مشعَّةً.
- تُنتجُ تفاعلاتُ الاندماجِ النوويِّ طاقةً هائلةً على صورةِ حرارةٍ وضوءٍ. إذا ما سُيطرَ على تفاعلاتِ الاندماجِ، يصبحُ ممكنًا إنتاجُ طاقةٍ لكلِّ جرامٍ من الوقودِ أكثرَ بكثيرٍ من الطاقةِ لكلِّ جرامٍ من الوقودِ في تفاعلاتِ الانشطارِ.

المفردات

الانشطارُ النوويُّ nuclear fission (347)
التفاعلُ المتسلسلُ chain reaction (347)
الكتلةُ الحرجةُ critical mass (348)
المُفاعلُ النوويُّ nuclear reactor (348)
محطَّةُ توليدِ الطاقةِ النوويَّةِ nuclear power plant (348)
واقي الإشعاعِ shielding (348)
قضبانُ التحكُّمِ control rods (348)
المهدِّئُ moderator (348)
الاندماجُ النوويُّ nuclear fusion (349)

اختيارٌ من متعدِّدٍ

1. أكملِ المعادلةَ النوويَّةَ التاليةَ: $\underline{\ ?\ } \rightarrow {}^{187}_{76}\text{Os} + {}^{0}_{-1}\beta$

أ. ${}^{187}_{77}\text{Os}$ ج. ${}^{187}_{77}\text{Ir}$
ب. ${}^{187}_{75}\text{Os}$ د. ${}^{187}_{75}\text{Re}$

2. تتميَّزُ كتلةُ النواةِ بأنها
أ. أكبرُ من كتلةِ البروتوناتِ والنيوتروناتِ التي تكوِّنُ هذه النواةَ.
ب. تساوي كتلةَ البروتوناتِ والنيوتروناتِ التي تكوِّنُ هذه النواةَ.
ج. أصغرُ من كتلةِ البروتوناتِ والنيوتروناتِ التي تكوِّنُ هذه النواةَ.
د. تتحوَّلُ إلى طاقةٍ.

3. أيُّ نوعٍ من الإشعاعِ له القدرةُ الأكبرُ على الاختراقِ؟
أ. جسَيمُ ألفا ج. أشعةُ جاما
ب. جسَيمُ بيتّا د. نيوترون

4. أيُّ جسيمَيْنِ لهما الكتلةُ نفسُها، وشحنتانِ متعاكستانِ؟
أ. جسَيمُ بيتّا وبوزيترونٌ ج. بروتونٌ وإلكترونٌ
ب. نيوترونٌ وبروتونٌ د. جسَيمُ ألفا وبروتونٌ

5. أيٌّ من المعادلاتِ النوويَّةِ التاليةِ هي معادلةٌ موزونةٌ بشكلٍ صحيحٍ؟
أ. ${}^{37}_{18}\text{Ar} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{37}_{17}\text{Cl}$
ب. ${}^{6}_{3}\text{Li} + 2{}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{3}_{1}\text{H}$
ج. ${}^{254}_{99}\text{Es} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{258}_{101}\text{Md} + 2{}^{1}_{0}n$
د. ${}^{14}_{7}\text{N} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{2}_{1}\text{H}$

6. أشعَّةُ جاما
أ. لها الطاقةُ نفسُها التي تمتلكُها جسَيماتُ بيتّا.
ب. هي ضوءٌ مرئيٌّ.
ج. ليسَ لها شحنةٌ ولا كتلةٌ.
د. ليسَتْ شكلاً من أشكالِ الأشعَّةِ الكهرومغنطيسيَّةِ.

7. أيٌّ من النوَيداتِ التاليةِ نويدةٌ مشعَّةٌ؟
أ. ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ ج. ${}^{12}_{6}\text{C}$
ب. ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ د. ${}^{206}_{82}\text{Pb}$

8. عمرُ النصفِ للثوريوم-234 هو 24 يومًا. إذا كانَ لديكَ عيِّنةٌ من ثوريوم-234 كتلتُها 42 g، فكم سيبقى منها بعدَ 72 يومًا؟
أ. 42.0 g ج. 10.5 g
ب. 21.0 g د. 5.25 g

9. تحتاجُ عيِّنةٌ من الفرنسيوم-210، كتلتُها 4.0 g، إلى 5.2 دقائق لتتحلَّ ويبقى منها 1.0 g فقط. كم يبلغُ عُمرُ النصفِ للفرنسيومِ-210؟
أ. 1.3 دقيقة ج. 5.2 دقائق
ب. 2.6 دقيقة د. 7.8 دقائق

مراجعةُ المفاهيم

10. ما المقصودُ بكلٍّ من:
نقصِ الكتلةِ، الرونتجن، الرّم، الانشطارِ النوويِّ، الاندماجِ النوويِّ، عمرِ النصفِ، الكتلةِ الحرجةِ، عدّادِ جايجر-مولر، العدّادِ الوميضيِّ، الشارةِ الفيلميَّةِ؟

11. أ. ما العلاقةُ بين طاقةِ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ والعددِ الكُتليِّ؟
ب. كيفَ تؤثِّرُ طاقةُ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ على استقرارِ النواةِ؟

12. صفْ ثلاثَ طرائقَ يؤثِّرُ فيها عددُ البروتوناتِ وعددُ النيوتروناتِ في النواةِ على استقرارِ النواةِ.

13. أين تقعُ معظمُ النوَيداتِ المشعَّةِ في الجدولِ الدوريِّ؟

14. أيُّ تغيُّراتٍ في العددِ الذريِّ والعددِ الكُتليِّ تحدثُ في الأنواعِ التاليةِ من الانحلالِ الإشعاعيِّ؟
أ. انبعاثُ ألفا
ب. انبعاثُ بيتا
ج. انبعاثُ البوزيترون
د. الأَسْرُ الإلكتروني

15. أيُّ نوعٍ من أنواعِ الانحلالِ الإشعاعيِّ يسبِّبُ تحوُّلاً نوويًّا في النوَيدةِ؟ (ملاحظة: راجعْ تعريفَ التحوُّلِ النوويِّ)

16. وضِّحْ كيفَ يؤثِّرُ انبعاثُ بيتّا وانبعاثُ البوزيترون والأَسْرُ الإلكترونيُّ في نسبةِ النيوترون/البروتون.

17. اكتبِ التفاعلاتِ النوويَّةَ التي تُظهرُ تحوُّلاً جسيميًّا للأنواعِ التاليةِ من الانحلالِ الإشعاعيِّ:
أ. انبعاثُ بيتّا.
ب. انبعاثُ البوزيترون.
ج. الأَسْرُ الإلكترونيُّ.

18. قارنْ بينَ الإلكتروناتِ وجسَيماتِ بيتّا والبوزيترونات.

19. أ. ما أشعَّةُ جاما؟
ب. كيف تكوَّنَتْ أشعَّةُ جاما في رأيِ العُلماءِ؟

20. كيفَ يرتبطُ عُمرُ النصفِ للنوَيدةِ باستقرارِها؟

21. اذكرِ النويداتِ الأمَّ الثلاثَ لسلاسلِ الانحلالِ الطبيعيَّةِ.

22. كيف تُنتجُ النظائرُ المشعَّةُ الاصطناعيَّةُ؟

23. علِّلْ ما يلي:
أ. تكونُ النيوتروناتُ في قذفِ أنويةِ الذرّاتِ أكثرَ فاعليَّةً من البروتوناتِ أو جُسَيماتِ ألفا.
ب. تكونُ عناصرُ ما بعدَ اليورانيوم كلُّها مشعَّةً. (راجعِ القسم 12-1)
ج. تؤثِّرُ المادَّةُ المشعَّةُ في الفيلمِ الفوتوغرافيِّ، وإن كانَ مغلَّفًا بورقٍ أسودَ.
د. يكونُ معدَّلُ الانحلالِ الإشعاعيِّ الثابتُ للأنويةِ المشعَّةِ مهمًّا في عمليَّةِ التأريخِ، باستخدامِ الموادِّ المشعَّةِ.

24. قارنْ بين كلٍّ من ألفا، بيتّا، جامّا، من حيثُ قدرةُ الاختراقِ.

25. كيف يُتلفُ الإشعاعُ النوويُّ الأنسجةَ البيولوجيَّةَ؟

26. وضِّحْ كيفيَّةَ استخدامِ الشارّاتِ الفيلميَّةِ، وعدّاداتِ جايجر–موللر، والعدّاداتِ الوميضيَّةِ، في الكشفِ عن الإشعاعِ وقياسِ شدَّةِ التعرُّضِ الإشعاعيِّ.

27. كيف يتمُّ تقديرُ عمرِ مادَّةٍ تحتوي على نوَيدةٍ مشعَّةٍ؟

28. كيفَ يحفِّزُ انشطارُ اليورانيوم–235 ؟

29. كيفَ يُنتجُ انشطارُ اليورانيوم–235 تفاعلاً متسلسلاً؟

30. صفْ وظيفةَ كلٍّ من المكوِّناتِ الخمسةِ للمفاعلِ النوويِّ.

31. صفِ التفاعلَ الذي بموجبِهِ تُنتجُ طاقةُ الشمسِ.

32. ما المشكلةُ الواجبُ تخطّيها قبلَ أن تصبحَ تفاعلاتُ الاندماجِ المسيطرُ عليها حقيقةً واقعةً؟

مسائل

33. تبلغُ كتلةُ ذرَّةِ $^{20}_{10}Ne$، 19.992 44 amu. احسبْ نقصَ الكتلةِ.

34. إذا علمْتَ أن كتلةَ ذرَّةِ $^{7}_{3}Li$ هي 7.01600 amu، فما قيمةُ نقصِ الكتلةِ لهذهِ النوَيدةِ؟

35. احسبْ قيمةَ طاقةِ الربطِ النوويِّ لذرَّةِ ليثيوم–6؛ علمًا بأن الكتلةَ المقيسةَ لهذهِ الذرَّةِ هي 6.015 amu.

36. احسبْ طاقاتِ الربطِ النوويِّ للنواتَيْنِ التاليتَيْن، وحدِّدْ أيَّ النواتَيْنِ تُطلقُ طاقةً أكثرَ لدى تكوُّنِها. تحتاجُ إلى معلوماتٍ من الجدولِ الدوريِّ ومن هذا الكتابِ.
أ. الكتلةُ الذريَّةُ لـ $^{35}_{19}K$، هي 34.988011 amu.
ب. الكتلةُ الذريَّةُ لـ $^{23}_{11}Na$، هي 22.989767 amu.

37. كتلةُ $^{7}_{3}Li$ هي 7.01600 amu. احسبْ طاقةَ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ.

38. احسبْ نسبَ النيوترون/البروتون في النوَيداتِ التاليةِ:
أ. $^{12}_{6}C$
ب. $^{3}_{1}H$
ج. $^{206}_{82}Pb$
د. $^{134}_{50}Sn$

39. أ. حدِّدْ موقعَ النوَيداتِ في المسألةِ 38، على الشكلِ البيانيِّ الموضَّحِ في الشكلِ 12-2. أيٌّ من هذهِ النوَيداتِ تقعُ ضمنَ نطاقِ الاستقرارِ؟
ب. حدِّدْ إن كانَت نسبةُ النيوترون/البروتون في النوَيداتِ المستقرَّةِ تميلُ نحوَ القيمةِ 1:1 أو 1:1.5.

40. أكمل المعادلاتِ النوويَّة التالية. (راجعِ المسألةَ النموذجيَّة 12-1)

أ. $^{43}_{19}K \rightarrow ^{43}_{20}Ca + \underline{\ ?\ }$

ب. $^{233}_{92}U \rightarrow ^{229}_{90}Th + \underline{\ ?\ }$

ج. $^{11}_{6}C + \underline{\ ?\ } \rightarrow ^{11}_{5}B$

د. $^{13}_{7}N \rightarrow ^{0}_{+1}\beta + \underline{\ ?\ }$

41. اكتبِ المعادلةَ النوويَّة لإطلاقِ جسَيم ألفا من $^{210}_{84}Po$.

42. اكتبِ المعادلة النوَوية لإطلاق جسَيم بيتّا من $^{210}_{82}Pb$.

43. عمرُ النصفِ للبلوتونيوم-239 هو 24 110 سنوات، كم من كتلةِ البلوتونيوم-239 الأصليَّةِ المساويةِ لـ 100 g تبقى بعد 96 440 سنةً؟ (راجعِ المسألةَ النموذجيَّة 12-2)

44. كم ملّيجرامًا من عيّنةِ الراديوم-226 كتلتُها 15.0 mg يبقى بعد 6396 سنةً؟ عمرُ النصفِ للراديوم-226 هو 1599 سنةً.

45. كم يبقى من كمّيَّةِ 0.250 g من الراديوم-226 بعدَ 4797 سنةً؟ عمرُ النصفِ للراديوم-226 هو 1599 سنة.

مراجعةٌ متنوعة

46. أكمل التفاعلاتِ النوويَّة التالية:

أ. $^{239}_{93}Np \rightarrow ^{0}_{-1}\beta + \underline{\ ?\ }$

ب. $^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow \underline{\ ?\ }$

ج. $^{32}_{15}P + \underline{\ ?\ } \rightarrow ^{33}_{15}P$

د. $^{236}_{92}U \rightarrow ^{94}_{36}Kr + \underline{\ ?\ } + 3^{1}_{0}n$

47. النوَيدةُ الأمُّ لسلسلةِ انحلالِ الثوريوم هي $^{232}_{90}Th$ وتأتي الانحلالاتُ الأربعةُ الأولى، كالآتي: انبعاثُ ألفا، انبعاثُ بيتّا، انبعاثُ بيتّا، انبعاثُ ألفا. اكتبِ المعادلاتِ النوويَّة لهذه السلسلةِ من الانبعاثات.

48. احسبْ نسبَ النيوترون/البروتون للنوَيداتِ التالية، ثم حدِّدْ موقعَها في نطاقِ الاستقرار.

أ. $^{235}_{92}U$ ج. $^{56}_{26}Fe$

ب. $^{16}_{8}O$ د. $^{156}_{60}Nd$

49. احسبْ طاقةَ الربطِ لكلِّ نويَّةٍ لـ $^{238}_{92}U$ بالجول، علمًا بأن الكتلةَ الذريَّةَ لنواةِ $^{238}_{92}U$ هي 238.050 784 amu.

50. الطاقةُ الصادرةُ لدى تكوُّنِ نواة $^{56}_{26}Fe$ هي 7.89×10^{-11} J. استخدمْ معادلةَ أينشتاين، $E = mc^2$، لتحديدِ كمّيَّةِ الكتلةِ المفقودةِ (بالكيلوجرام) في هذه العمليَّةِ.

51. احسبْ طاقةَ الربطِ لمولٍ واحدٍ من ذرّاتِ الديوتيريوم. الكتلةُ المقيسةُ من الديوتيريوم هي 2.0140 amu.

تفكيرٌ ناقد

52. لماذا نقارنُ طاقةَ الربطِ لكلِّ جسيمٍ نوويٍّ لنويداتٍ مختلفةٍ بدلَ استخدامِ طاقةِ الربطِ الكليَّةِ بالنواةِ للنوَيداتِ المختلفةِ؟

53. أيٌّ من نويداتِ الكربونِ التاليةِ هو الأكثرُ استقرارًا؟ فسِّرْ إجابتك.

أ. $^{11}_{6}C$ ب. $^{12}_{6}C$

54. أيٌّ من نويداتِ الحديدِ التاليةِ هو الأكثرُ استقرارًا؟ فسِّرْ إجابتك.

أ. $^{56}_{26}Fe$ ب. $^{59}_{26}Fe$

55. استخدمِ البياناتِ الواردةَ في الجدولِ المبيَّنِ لتحديدِ ما يأتي:

أ. النظائرِ الأمثلِ في تحديدِ أعمارِ الصخورِ القديمة.

ب. النظائرِ الأجدى استخدامًا في التتبُّعِ. علِّلْ إجابتك.

العنصر	عُمرُ النصف
البوتاسيوم-40	1.28×10^9 سنةٍ
البوتاسيوم-42	12.36 ساعةً
اليورانيوم-238	4.468×10^9 سنةٍ
اليورانيوم-239	23.47 دقيقةً

56. اكتبْ تقريرًا عن حادثِ المفاعلِ النوويِّ في تشرنوبيل عامَ 1986. ما العواملُ التي أدَّتْ إلى هذا الحادثِ؟

57. ابحثْ في مشروعاتِ طاقةِ الاندماجِ النوويِّ التي أجريَتْ. ما المعوِّقاتُ التي تعترضُ الوصولَ إلى طريقةٍ اقتصاديَّةٍ لإنتاجِ الطاقةِ بالاندماجِ النوويِّ؟

تقويمٌ بديل

58. مستخدمًا المكتبةَ، اكتبْ تقريرًا حولَ الاستخداماتِ الطبّيَّةِ للنظائرِ المشعَّةِ، مثل الكوبالت-60 والتكنيشيوم-99. قوِّمِ الفوائدَ والمخاطرَ الناجمةَ عن استخدامِ النظائرِ المشعَّةِ في تشخيصِ الحالاتِ الطبيَّةِ. قدِّمْ تقريرَك أمامَ زملائكَ في الصفِّ.

الجدول (أ-1) حرارةُ الاحتراقِ

المادة	الصيغة	الحالة	ΔH_c
هيدروجين	H_2	*g*	–285.8
جرافيت	C	*s*	–393.5
أولُ أكسيدِ الكربونِ	CO	*g*	–283.0
ميثان	CH_4	*g*	–890.8
إيثان	C_2H_6	*g*	–1560.7
بروبان	C_3H_8	*g*	–2219.2
بيوتان	C_4H_{10}	*g*	–2877.6
بنتان	C_5H_{12}	*g*	–3535.6
هكسان	C_6H_{14}	*l*	–4163.2
هبتان	C_7H_{16}	*l*	–4817.0
أوكتان	C_8H_{18}	*l*	–5470.5
إيثين (إيثلين)	C_2H_4	*g*	–1411.2
بروبين (بروبلين)	C_3H_6	*g*	–2058.0
إيثاين (أسيتلين)	C_2H_2	*g*	–1301.1
بنزين	C_6H_6	*l*	–3267.6
تولوين	C_7H_8	*l*	–3910.3
نفثالين	$C_{10}H_8$	*s*	–5156.3
أنثراسين	$C_{14}H_{10}$	*s*	–7136.0
ميثانول	CH_3OH	*l*	–726.1
إيثانول	C_2H_5OH	*l*	–1366.8
إيثر	$(C_2H_5)_2O$	*l*	–2751.1
فورمالدهايد	CH_2O	*g*	–570.7
جلوكوز	$C_6H_{12}O_6$	*s*	–2803.0
سكروز	$C_{12}H_{22}O_{11}$	*s*	–5640.9

ΔH_c = حرارةُ الاحتراقِ لمادّةٍ معيَّنةٍ. يعبَّرُ عن كلِّ قيمِ ΔH_c بـ kJ/mol من مادّةٍ مؤكسدةٍ إلى $H_2O(l)$ و/أو $CO_2(g)$ عند درجةِ حرارةِ 25°C وتحت ضغطٍ ثابتٍ.
s = صلب. *l* = سائل. *g* = غاز.

الجدول (أ-2) ذوبانيَّةُ الغازاتِ في الماءِ

حجمُ الغازِ (L) عند STP الذي يمكنُ إذابتُهُ في 1L من الماءِ عند درجةِ حرارةٍ (°C) محدَّدةٍ.

الغاز	0°C	10°C	20°C	60°C
أكسجين	0.048 89	0.038 02	0.031 02	0.019 46
أمونيا	1130	870	680	200
أحادي أكسيدِ الكربونِ	0.035 37	0.028 16	0.023 19	0.014 88
أحادي أكسيدِ النيتروجينِ	0.073 81	0.057 09	0.047 06	0.029 54
ثنائي أكسيدِ الكبريتِ	79.789	56.647	39.374	–
ثنائي أكسيدِ الكربونِ	1.713	1.194	0.878	0.359
كبريتيدُ الهيدروجينِ	4.670	3.399	2.582	1.190
كلور	–	3.148	2.299	1.023
كلوريدُ الهيدروجينِ	512	475	442	339
ميثان	0.055 63	0.041 77	0.033 08	0.019 54
نيتروجين*	0.023 54	0.081 61	0.015 45	0.010 23
هواء	0.029 18	0.022 84	0.018 68	0.012 16
هيدروجين	0.021 48	0.019 55	0.018 19	0.016 00

*النيتروجينُ الجوّيُّ N_2 98.815%، غازاتٌ خاملةٌ 1.185%.

الجدول (أ-3)   جدولٌ للذوبانيَّةِ

	أسيتات	أكسيد	بروميد	سليكات	فوسفات	كبريتات	كبريتيد	كربونات	كرومات	كلورات	كلوريد	نيترات	هيدروكسيد	يوديد
ألمنيوم	S	a	S	I	A	S	d	–	–	S	S	S	A	S
أمونيوم	S	–	S	I	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
باريوم	S	S	S	S	A	a	d	P	A	S	S	S	S	S
بوتاسيوم	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
حديد (II)	–	A	S	–	A	S	A	P	–	S	S	S	A	S
حديد (III)	–	A	S	–	P	P	d	–	A	S	S	S	A	S
خارصين	S	P	S	A	A	S	A	P	P	S	S	S	A	S
رصاص (II)	S	P	S	A	A	P	A	A	A	S	S	S	P	P
زئبق (I)	P	A	A	–	A	P	I	A	P	S	a	S	–	A
زئبق (II)	S	P	S	–	A	d	I	–	P	S	S	S	A	P
سترونشيوم	S	S	S	A	A	P	S	P	P	S	S	S	S	S
صوديوم	S	d	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
فضة	P	P	a	–	A	P	A	A	P	S	a	S	–	I
قصدير (II)	d	A	S	–	A	S	A	–	A	S	S	d	A	S
قصدير (IV)	S	A	S	–	–	S	A	–	S	–	S	–	P	d
كالسيوم	S	P	S	P	P	S	S	P	S	S	S	S	A	S
مغنيسيوم	S	A	S	A	S	S	d	P	S	S	S	S	S	S
منجنيز (II)	S	A	S	I	P	S	A	P	–	S	S	S	A	S
نحاس (II)	S	A	S	A	A	S	A	–	–	S	S	S	A	–
هيدروجين	S	S	S	I	S	S	S	–	–	S	S	S	–	S

S = قابلٌ للذوبان في الماءِ. A = قابلٌ للذوبان في الأحماض، غيرُ قابل للذوبان في الماءِ. P = قابلٌ للذوبانِ في الماءِ جزئيًّا، قابلٌ للذوبان في المحاليل الحمضيَّةِ المخفَّفةِ. I = غيرُ قابلٍ للذوبان في المحاليلِ الحمضيَّةِ المخفَّفةِ وفي الماءِ. a = ذو قابليةٍ قليلةٍ للذوبان في الأحماضِ، غيرُ قابلٍ للذوبان في الماءِ. d = يتفكَّكُ في الماءِ.

الجدول (أ-4) ذوبانيَّةُ المركَّباتِ

الذوبانيةُ معطاةٌ بـ g من المذيبِ الذي يمكنُ إذابتُهُ في g 100 ماءً عند درجةِ حرارةٍ (°C) محدَّدةٍ.

المركّب	الصيغة	0°C	20°C	60°C	100°C
أسيتاتُ الصوديوم	$NaC_2H_3O_2$	36.2	46.4	139	170
أسيتاتُ الفضة	$AgC_2H_3O_2$	0.73	1.05	1.93	2.59^{80°
بروميدُ البوتاسيوم	KBr	53.6	65.3	85.5	104
بيرمنجناتُ البوتاسيوم	$KMnO_4$	2.83	6.34	22.1	–*
سكروز	$C_{12}H_{22}O_{11}$	179.2	203.9	287.3	487.2
فلوريدُ الكالسيوم	CaF_2	0.0016^{18°	0.0017^{26°	–*	–*
كبريتاتُ الألمنيوم	$Al_2(SO_4)_3$	31.2	36.4	59.2	89.0
كبريتاتُ الأمونيوم	$(NH_4)_2SO_4$	70.6	75.4	88	103
كبريتاتُ الباريوم	$BaSO_4$	*–	0.000246^{25°	–*	0.000413
كبريتاتُ البوتاسيوم	K_2SO_4	7.4	11.1	18.2	24.1
كبريتاتُ الكالسيوم	$CaSO_4$	–*	0.209^{30°	–*	0.1619
كبريتاتُ الليثيوم	Li_2SO_4	36.1	34.8	32.6	30.9^{90°
كبريتاتُ المغنيسيوم	$MgSO_4$	22.0	33.7	54.6	68.3
كبريتاتُ النحاس (II) خماسيُّ الهيدراتِ	$CuSO_4{\bullet}5H_2O$	23.1	32.0	61.8	114
كربوناتُ الباريوم	$BaCO_3$	–*	0.0022^{18°	–*	0.0065
كربوناتُ الكالسيوم	$CaCO_3$	–*	0.0014^{25°	–*	0.0018^{75°
كربوناتُ الكالسيوم الهيدروجينيَّةِ	$Ca(HCO_3)_2$	16.15	16.60	17.50	18.40
كروماتُ البوتاسيوم	K_2CrO_4	56.3	63.7	70.1	74.5^{90°
كلوراتُ البوتاسيوم	$KClO_3$	3.3	7.3	23.8	56.3
كلوراتُ الصوديوم	$NaClO_3$	79.6	95.9	137	204
كلوريدُ الأمونيوم	NH_4Cl	29.4	37.2	55.3	77.3
كلوريدُ الباريوم ثنائيُّ الهيدراتِ	$BaCl_2{\bullet}2H_2O$	31.2	35.8	46.2	59.4
كلوريدُ البوتاسيوم	KCl	28.0	34.2	45.8	56.3
كلوريدُ الرصاص	$PbCl_2$	0.67	1.00	1.94	3.20
كلوريدُ الزئبق (I)	Hg_2Cl_2	–*	0.00020^{25°	0.001^{43°	–*
كلوريدُ الزئبق (II)	$HgCl_2$	3.63	6.57	16.3	61.3
كلوريدُ الصوديوم	$NaCl$	35.7	35.9	37.1	39.2
كلوريدُ الفضَّة	$AgCl$	0.000089^{10°	–*	–*	0.0021
كلوريدُ الليثيوم	$LiCl$	69.2	83.5	98.4	128
كلوريدُ النحاس (II)	$CuCl_2$	68.2	73.0	96.5	120
نيتراتُ الأمونيوم	NH_4NO_3	118	192	421	871
نيتراتُ الباريوم	$Ba(NO_3)_2$	4.95	9.02	20.4	34.4
نيتراتُ البوتاسيوم	KNO_3	13.9	31.6	106	245
نيتراتُ الرصاص (II)	$Pb(NO_3)_2$	37.5	54.3	91.6	133
نيتراتُ الصوديوم	$NaNO_3$	73.0	87.6	122	180
نيتراتُ الفضَّة	$AgNO_3$	122	216	440	733
هيدروكسيدُ الباريوم	$Ba(OH)_2$	1.67	3.89	20.94	101.40^{80°
هيدروكسيدُ الكالسيوم	$Ca(OH)_2$	0.189	0.173	0.121	0.076
هيدروكسيدُ المغنيسيوم	$Mg(OH)_2$	–*	0.0009^{18°	–*	0.004
يوديدُ البوتاسيوم	KI	128	144	176	206

*الرمزُ (–) يشيرُ إلى عدم توافر القيم.

الجدول (أ-5) حرارةُ التكوين

المادة	الحالة	ΔH_f
أمونيا	g	−45.9
أكسجين (O_2)	g	0.00
أكسيدُ الحديد (II)	s	−272.0
أكسيدُ الحديد (III)	s	−824.2
أكسيدُ الخارصين	s	−350.5
أكسيدُ الرصاص (II)	s	−217.3
أكسيدُ الرصاص (IV)	s	−274.5
أكسيدُ الزئبق (II) (أحمر)	s	−90.8
أكسيدُ الكالسيوم	s	−634.9
أكسيدُ المغنيسيوم	s	−601.6
أكسيدُ المنجنيز (II)	s	−520.0
أكسيدُ النحاس (II)	s	−157.3
أكسيدُ ثنائيُّ الهيدروجين (ماء)	g	−241.8
أكسيدُ ثنائيُّ الهيدروجين (ماء)	l	−285.8
أوزون (O_3)	g	+142.7
أحادي أكسيد النيتروجين الثنائيّ	g	+82.1
أحادي أكسيد النيتروجين	g	+90.29
أحادي أكسيد الكربون	g	−110.5
إيثان	g	−83.8
إيثاين (أسيتيلين)	g	+228.2
بروميدُ البوتاسيوم	s	−393.8
بروميدُ الصوديوم	s	−361.8
بروميدُ الهيدروجين	g	−36.29
بنزين	g	+82.88
بنزين	l	+49.080
بيروكسيدُ الهيدروجين	g	−136.3
بيروكسيدُ الهيدروجين	l	−187.8
ثلاثي أكسيد الكبريت	g	−395.7
ثنائي أكسيد السليكون (كوارتز)	s	−910.7
ثنائي أكسيد الكبريت	g	−296.8
ثنائي أكسيد الكربون	g	−393.5
ثنائي أكسيد النيتروجين	g	+33.2
رباعي أكسيد النيتروجين الثنائيّ	g	+9.2
عاشرُ أكسيد الفوسفور الرباعيّ	s	−3009.9
فلوريدُ الهيدروجين	g	−273.3
كبريتاتُ الأمونيوم	s	−1180.9
كبريتاتُ الباريوم	s	−1473.2
كبريتاتُ البوتاسيوم	s	−1437.8
كبريتاتُ الحديد (II)	s	−928.4
كبريتاتُ الخارصين	s	−980.14
كبريتاتُ الرصاص (II)	s	−919.94
كبريتاتُ الصوديوم	l	−1387.1
كبريتاتُ الكالسيوم	s	−1434.5
كبريتاتُ المغنيسيوم	s	−1261.79
كبريتاتُ المنجنيز (II)	s	−1065.3
كبريتاتُ النحاس (II)	s	−771.4
كبريتيدُ الحديد (II)	s	−100.0
كبريتيدُ الفضَّة	s	−32.59
كبريتيدُ الهيدروجين	g	−20.6
كربون (ألماس)	s	+1.9
كربون (جرافيت)	s	0.00
كربونات الكالسيوم	s	−1207.6
كلوريدُ الأمونيوم	s	−314.4
كلوريدُ الباريوم	s	−858.6
كلوريدُ البوتاسيوم	s	−436.49
كلوريدُ الحديد (II)	s	−399.4
كلوريدُ الزئبق (I)	s	−264.2
كلوريدُ الزئبق (II)	s	−230.0
كلوريدُ الصوديوم	s	−385.9
كلوريدُ الفضَّة	s	±0.5 −127.01
كلوريدُ القصدير (II)	l	−511.3
كلوريدُ الكالسيوم	s	−795.4
كلوريدُ الليثيوم	s	−408.6
كلوريدُ المغنيسيوم	s	−461.5
كلوريدُ الهيدروجين	g	−92.3
ميثان	g	−74.9
نيترات الباريوم	s	−768.2
نيترات البوتاسيوم	s	−494.6
نيترات الخارصين	s	−483.7
نيترات الرصاص (II)	s	−451.9
نيترات الصوديوم	s	−467.9
نيترات الفضَّة	s	−120.5
نيترات الكالسيوم	s	−938.2
نيترات الليثيوم	s	−483.1
نيترات النحاس (II)	s	−302.9
هيدروجين (H_2)	g	−0.00
هيدروكسيدُ البوتاسيوم	s	−424.58
هيدروكسيدُ الصوديوم	s	−425.9
هيدروكسيدُ الكالسيوم	s	−983.2
يود (I_2)	s	0.00
يود (I_2)	g	+62.4
يوديدُ الهيدروجين	g	+26.5

ΔH_f = هي حرارةُ التكوين للمادَّةِ المعطاةِ انطلاقًا من عناصرِها. جميعُ قيمِ ΔH_f يتمُّ التعبيرُ عنها بـ kJ/mol عند درجةِ حرارةٍ 25°C. تدلُّ القيمُ السالبةُ لـ ΔH_f على تفاعلاتٍ طاردةٍ للحرارة. s = صلب. l = سائل. g = غاز.

المفاهيم والمصطلحات

أ

آليَّةُ التفاعل reaction mechanism
الطريقةُ التي يحدثُ بها تفاعلٌ كيميائيٌّ، ويعبَّرُ عنها بسلسةٍ من الخطواتِ أو المعادلاتِ الكيميائيَّةِ. (153)

الاتِّزانُ الكيميائيُّ chemical equilibrium
الحالةُ التي تكونُ فيها سرعةُ التفاعلِ الأماميِّ مساويةً لسرعةِ التفاعلِ العكسيِّ، وتبقى فيها تراكيزُ النواتجِ والمتفاعلاتِ ثابتةً. (178)

اتِّزانُ المحلولِ solution equilibrium
الحالةُ الفيزيائيَّةُ التي يتساوى فيها معدَّلُ سرعةِ الإذابةِ مع معدَّلِ سرعةِ الترسيبِ. (16)

الاختزالُ reduction
عمليَّةُ كسبِ إلكتروناتٍ أو نقصانٍ في عددِ الأكسدةِ. (217)

ارتفاعُ درجةِ الغليانِ boiling-point elevation
الفرقُ بين درجةِ غليانِ المذيبِ النقيِّ ودرجةِ غليانِ السائلِ في محلولٍ. ويعتمدُ الارتفاعُ على كمِّيَّةِ جسيماتِ المذابِ الموجودةِ. (54)

الإستر ester
مركَّبٌ عضويٌّ يحتوي على مجموعةِ كربوكسيل حلَّتْ فيها مجموعةُ ألكيلٍ محلَّ هيدروجينِ الهيدروكسيلِ. (307)

أسْرُ الإلكترونِ electron capture
العمليَّةُ التي تلتقطُ خلالَها نواةُ ذرَّةٍ إلكترونًا من فلكٍ داخليٍّ لهذهِ الذرَّةِ. (337)

الأسموزيَّةُ أو التناضحُ osmosis
انتشارُ الماءِ أو مذيبٍ آخرَ من المحلولِ الأقلِّ تركيزًا (لمذاب) إلى المحلولِ الأكثرِ تركيزًا (لمذاب) عبر غشاءٍ منفذٍ بالنسبةِ للمذيبِ. (56)

الإشعاعُ النوويُّ nuclear radiation
الجسيماتُ التي تطلقُها النواةُ خلالَ الانحلالِ الإشعاعيِّ كالنيوترونات، والإلكتروناتِ والفوتوناتِ. (335)

أشعَّةُ جاما gamma rays
موجاتٌ كهرومغنطيسيَّةٌ ذاتُ طاقةٍ عاليةٍ تنبعثُ من النواةِ لدى تحوُّلِها من حالةٍ مستثارةٍ إلى حالةِ الطاقةِ الأرضيَّةِ. (337)

الأعدادُ السحريَّةُ magic numbers
هي الأعدادُ (2، 8، 20، 28، 50، 82، 126)، التي تمثِّلُ عددَ الجُسيماتِ في نواةِ ذرَّةٍ فائقةِ الاستقرارِ، لها طبقاتٌ مكتملةٌ من البروتوناتِ والنيوتروناتِ.(333)

الأكسدةُ oxidation
عمليَّةُ فقدِ إلكترونٍ واحدٍ أو عدَّةِ إلكتروناتٍ من مادَّةٍ، بحيثُ يزيدُ من حالةِ أكسدتِها. (216)

الألدهيد aldehyde
مركَّبٌ عضويٌّ يحتوي على مجموعةٍ كربونيليَّةٍ مرتبطةٍ بذرَّةِ كربونٍ في طرفِ سلسلةِ ذرّاتِ الكربونِ. (304)

الألكان alkane
هيدروكربونٌ مشبعٌ يتميَّزُ بسلسلةٍ مستقيمةٍ أو متفرِّعةٍ من الكربونِ، وتحتوي على روابطَ أحاديَّةٍ فقطْ. (268)

الألكانُ الحلقيُّ cycloalkane
ألكانٌ تترتَّبُ فيه ذرّاتُ الكربونِ على شكلِ حلقةٍ. (269)

الألكاين alkyne
هيدروكربونٌ غيرُ مشبعٍ يحتوي على رابطةٍ تساهميَّةٍ ثلاثيَّةٍ واحدةٍ أو أكثرَ. (283)

الإلكتروليت electrolyte
المادةُ التي تذوبُ في الماءِ لتُنتجَ محلولاً موصِّلاً للتيّارِ الكهربائيِّ. (13)

الإلكتروليتُ الضعيفُ weak electrolyte
مركَّبٌ يتفكَّكُ بنسبةٍ ضعيفةٍ فقط في محلولٍ مائيٍّ. (47)

الإلكتروليتُ القويُّ strong electrolyte
مركَّبٌ يتفكَّكُ بشكلٍ تامٍّ في محلولٍ مائيٍّ، كالأملاحِ المعدنيَّةِ القابلةِ للذوبانِ. (46)

الألكين alkene
هيدروكربونٌ غيرُ مشبعٍ يحتوي على رابطةٍ تساهميَّةٍ ثنائيَّةٍ واحدةٍ أو أكثرَ. (279)

الأمفوتيري amphoteric
صفةٌ تصفُ مادةً، كالماءِ، لها خصائصُ الحمضِ وخصائصُ القاعدةِ. (85)

الأمين amine
مركَّبٌ عضويٌّ مشتقٌّ من الأمونيا بإحلالِ مجموعةِ ألكيلٍ واحدٍ أو أكثرَ محلَّ الهيدروجينِ فيه. (309)

الأمينُ الأوَّليُّ primary amine
مركَّبٌ عضويٌّ استبدلَتْ فيه بذرَّةِ هيدروجينٍ واحدةٍ من جزيءِ الأمونيا مجموعةُ ألكيلٍ. (309)

الأمينُ الثالثيُّ tertiary amine
مركَّبٌ عضويٌّ استبدلَتْ فيه بثلاثِ ذرّاتِ هيدروجينٍ من جزيءِ الأمونيا ثلاثُ مجموعاتِ ألكيلٍ. (309)

الأمينُ الثانويُّ secondary amine
مركَّبٌ عضويٌّ استبدلَتْ فيه بذرَّتَيْ هيدروجينٍ من جزيءِ الأمونيا مجموعتا ألكيلٍ. (309)

الإنتروبي entropy
قياسُ العشوائيَّةِ أو عدمِ النظامِ في نظامٍ معيَّنٍ. (143)

الانحلالُ الإشعاعيُّ radioactive decay
عمليَّةُ انحلالٍ تلقائيٍّ للنواةِ، تتحوَّلُ بموجبها هذه النواةُ إلى نواةٍ أخفَّ نسبيًّا، مع إطلاقِ جسيماتٍ أو أشعَّةٍ كهرومغنطيسيَّةٍ أو كلتَيْهما. (335)

انخفاضُ درجةِ التجمُّدِ
freezing-point depression
الفرقُ بين درجتَيْ تجمُّدِ مذيبٍ نقيٍّ ومحلولٍ، وهو يتناسبُ طرديًّا مع كمِّيَّةِ المذابِ الموجودِ. (51)

الاندماجُ النوويُّ nuclear fusion
اتِّحادُ أنويةِ الذرّاتِ ذاتِ الكتلِ الخفيفةِ لتكوينِ أنويةٍ أثقلَ وأكثرَ استقرارًا؛ تُطلقُ هذه العمليَّةُ طاقةً أكبرَ من طاقةِ الانشطارِ. (349)

الانشطارُ النوويُّ nuclear fission
عمليَّةٌ تنشطرُ فيها الأنويةُ الثقيلةُ إلى أنويةٍ أكثرُ استقرارًا من ذواتِ الكتلِ المتوسِّطةِ، وتحرِّرُ كمّيّاتٍ كبيرةً من الطاقةِ. (347)

الأنود anode
هو القطبُ الذي تحدثُ عندَه عمليَّةُ الأكسدةِ. (236)

الإيثر ether
مركَّبٌ عضويٌّ ترتبطُ فيه مجموعتا ألكيل بذرَّةِ أكسجينٍ واحدةٍ. (301)

الأيزومرات isomers
مركَّباتٌ لها الصيغةُ الجزيئيَّةُ نفسُها، ولكنَّ لها تراكيبَ بنائيَّةً مختلفةً. (264)

الأيزومراتُ البنائيَّةُ structural isomers
أيزومراتٌ تختلفُ في الترتيبِ الذي تترابطُ فيهِ الذرّاتُ بعضُها مع بعضٍ. (269)

الأيزومراتُ الهندسيَّةُ geometric isomers
أيزومراتٌ لها ترتيبُ الذرّاتِ نفسُه، لكنَّها تختلفُ في ترتيبِ الذرّاتِ في الفضاءِ. (266)

الأيوناتُ المتفرِّجةُ spectator ions
أيوناتٌ موجودةٌ في المحلولِ الذي يحدثُ فيه تفاعلٌ، لكنَّها لا تشاركُ في هذا التفاعلِ. (43)

أيونُ الهيدرونيوم hydronium ion
أيون يتألَّفُ من بروتونٍ متَّحدٍ مع جزيءٍ من الماءِ، H_3O^+. (45)

ب

البترول petroleum
مزيجٌ معقَّدٌ من هيدروكربوناتٍ مختلفةٍ تختلفُ في مكوِّناتِها، يُستخدمُ على نطاقٍ واسعٍ كمصدرٍ للوقودِ. (277)

البنزين benzene
أبسطُ هيدروكربونٍ أروماتيٍّ. (284)

البوزيترون positron
جسيمٌ له كتلةُ الإلكترونِ نفسُها والغزْلُ نفسُه، لكنَّ شحنته موجبةٌ. (336)

البوليمر polymer
جزيءٌ ضخمٌ مؤلَّفٌ من عددٍ كبيرٍ من الوحداتِ الصغيرةِ (المونومرات) تترابطُ خلالَ التفاعلاتِ العضويَّةِ. (316)

بوليمرُ الإضافةِ addition polymer
بوليمرٌ يتكوَّنُ نتيجةَ تفاعلِ إضافةٍ تَسلسُليٍّ بين المونومراتِ التي تحتوي على رابطةٍ ثنائيَّةٍ. (317)

بوليمرُ التكاثفِ condensation polyme
بوليمرٌ يتكوَّنُ من خلالِ تفاعلاتِ تكاثفٍ. (320)

بوليمرٌ ثابتٌ حراريًا
thermosetting polymer
بوليمرٌ لا ينصهرُ عندَ تسخينِه، بلْ يحافظُ على شكلِهِ الأصليِّ. (316)

بوليمرٌ غيرُ ثابتٍ حراريًا
thermoplastic polymer
بوليمرٌ ينصهرُ عندَ تسخينِهِ، حيثُ يمكنُ إعادةُ تشكيلِهِ عدَّةَ مرّاتٍ. (316)

ت

تأثيرُ الأيونِ المشتركِ -ion effect
common
هو الظاهرةُ التي تسبِّبُ خلالَها إضافةُ أيونٍ مشتركٍ بين مذابَينِ، ترسُّبًا، أو تقليلاً للتأيُّنِ. (191)

التأريخُ بالإشعاع radioactive dating
العمليَّةُ التي يتمُّ بواسطتِها تحديدُ العمرِ التقريبيِّ لجسمٍ، وذلك اعتمادًا على كمِّيَّةِ بعضِ النويداتِ المشعَّةِ الموجودةِ فيهِ. (345)

التأيُّن ionization
عمليَّةُ إضافةِ أو إزالةِ إلكتروناتٍ من ذرّةٍ أو جزيءٍ، وهي تعطي الذرَّةَ أو الجزيءَ شحنةً صِرفةً.
أما في المحاليل، فالتأيُّنُ هو عمليَّةُ تكوينِ الأيوناتِ من جزيئاتِ المذابِ نتيجةً لفعلِ المذيبِ. (45)

التأيُّنُ الذاتيُّ للماءِ
self ionization of water
عمليَّةٌ يُنتجُ خلالها جزيئان من الماءِ أيونَ هيدرونيومٍ وأيونَ هيدروكسيدٍ، وذلك بانتقالِ بروتونٍ. (95)

التحفيز catalysis
عمليةُ تسريعِ تفاعلٍ كيميائيٍّ بفعلِ حفّازٍ. (162)

التحليلُ الكهربائيُّ electrolysis
العمليَّةُ التي يُستخدمُ فيها تيّارٌ كهربائيٌّ لينتجَ تفاعلاً مثلَ تفكُّكِ الماءِ. (250)

التحوُّلُ النوويُّ transmutation
تغيُّرٌ في هويَّةِ النواةِ ينتجُ عن تغيُّرٍ في عددِ بروتوناتِها. (334)

التحوُّلُ النوويُّ الاصطناعيُّ
artificial transmutation
تحوُّلُ ذرّاتِ عنصرٍ إلى ذرّاتِ عنصرٍ آخرَ كنتيجةٍ لتفاعلٍ نوويٍّ، ويتمُّ ذلك بقذفِ الأنويةِ بجسيماتٍ مشحونةٍ أو غيرِ مشحونةٍ. (341)

الترابطُ التسلسليُّ catenation
ترابطٌ تساهميٌّ لذرّاتِ العنصرِ نفسِهِ لتكوينِ سلاسلَ أو حلقاتٍ. (264)

التركيز concentration
كمِّيَّةُ مادَّةٍ معيَّنةٍ في كمِّيَّةٍ معطاةٍ من خليطٍ أو محلولٍ أو خامةٍ. (26)

التعادل neutralization

تفاعلُ الأيوناتِ التي تميِّزُ الأحماضَ (أيوناتِ الهيدرونيوم) مع الأيوناتِ التي تميِّزُ القواعدَ (أيوناتِ الهيدروكسيدِ) لتكوينِ جزيئاتِ الماءِ والملحِ. (89)

التغيُّرُ في المحتوى الحراريِّ enthalpy change

كمِّيَّةُ الطاقةِ الممتصَّةِ أو المنطلقةِ على صورةِ حرارةٍ من قِبَلِ نظامٍ معيَّنٍ خلالَ عمليَّةٍ تجري تحت ضغطٍ ثابتٍ. (130)

التغيُّرُ في الطاقةِ الحرَّةِ free energy change

الفرقُ بين التغيُّرِ في المحتوى الحراريِّ H وحاصلِ ضربِ درجةِ الحرارةِ بالكلفن في تغيُّرِ الإنتروبي أي T S تحت ضغطٍ ثابتٍ. (144)

التفاعلُ بين حمضٍ وقاعدةٍ برونشتد-لوري -Lowry acid-base reactio Brønsted

انتقالُ البروتوناتِ من الحمضِ إلى القاعدةِ. (79)

تفاعلُ الاستبدالِ substitution reaction

تفاعلٌ يتمُّ خلالَه استبدالُ ذرَّةٍ أو أكثرَ من ذرّاتِ الجزيءِ بذرَّةٍ أو مجموعةِ ذرّاتٍ أخرى. (313)

تفاعلُ الإضافةِ addition reaction

تفاعلٌ تتمُّ خلالَه إضافةُ ذرَّةٍ أو جزيءٍ إلى جزيءٍ غيرِ مشبعٍ. (313)

تفاعلُ الأكسدةِ-اختزالِ oxidation-reduction reaction

أيُّ تغيُّرٍ كيميائيٍّ تتأكسدُ خلالَهُ مادَّةٌ (تفقدُ إلكترونات) وتُختزلُ مادَّةٌ أخرى (تكسبُ إلكترونات). (217)

التفاعلُ الانعكاسيُّ reversible reaction

تفاعلٌ كيميائيٌّ تتفاعلُ خلالَهُ النواتجُ لإعادةِ تكوينِ المتفاعلاتِ الأصليَّةِ. (177)

تفاعلُ التكاثفِ condensation reaction

تفاعلٌ كيميائيٌّ يتَّحدُ فيه جزيئانِ أو أجزاءٌ من الجزيءِ نفسِه معًا، بإزالةِ جزيءٍ صغيرٍ، كالماءِ. (314)

تفاعلُ الحذفِ elimination reaction

تفاعلٌ كيميائيٌّ يزالُ فيه جزيءٌ بسيطٌ، كالماءِ أو الأمونيا، من ذرّاتِ كربونٍ متجاورةٍ في جزيءٍ عضويٍّ. (315)

تفاعلُ حمضٍ-قاعدةٍ لويس Lewis acid-base reaction

تكوُّنُ واحدةٍ أو أكثرَ من الروابطِ التساهميَّةِ بين مانحِ زوجٍ من الإلكتروناتِ وبين مستقبلِهِ. (82)

التفاعلُ غيرُ المتجانسِ heterogeneous reaction

تفاعلٌ توجدُ فيه المتفاعلاتُ في حالتَينِ فيزيائيَّتَينِ مختلفتَينِ. (160)

التفاعلُ المتجانسُ homogeneous reaction

تفاعلٌ توجدُ فيه المتفاعلاتُ والنواتجُ في حالةٍ فيزيائيَّةٍ واحدةٍ. (154)

التفاعلُ المتسلسلُ chain reaction

تفاعلٌ تكونُ فيه المادَّةُ التي يبدأُ التفاعلُ بها، هي أيضًا أحدُ النواتجِ والتي يمكنُها أن تبدأَ تفاعلاً جديدًا. (247)

التفاعلُ النصفيُّ half-reaction

جزءٌ من تفاعلٍ يتضمَّنُ الأكسدةَ وحدَها أو الاختزالَ وحدَه. (217)

التفاعلُ النوويُّ nuclear reaction

تفاعلٌ يؤثِّرُ في نواةِ ذرَّةٍ. (334)

التفكُّكُ dissociation

انفصالُ جزيءٍ إلى جزيئاتٍ أبسطَ، أو ذرّاتٍ أو جذورٍ أو أيوناتٍ. (39)

التحلل المائي hydrolysis

تفاعلٌ كيميائيٌّ بينَ جزيئاتِ الماءِ وأيوناتِ الملحِ الذائبِ. (19، 196)

ث

ثابتُ الاتِّزانِ equilibrium constant

نسبةُ الحاصلِ الرياضيِّ لتراكيزِ الموادِّ الناتجةِ عندَ الاتِّزانِ إلى الحاصلِ الرياضيِّ لتراكيزِ الموادِّ المتفاعلةِ، كلٌّ مرفوعٌ إلى أسٍّ يساوي معاملَ المادَّةِ التابعةِ له في المعادلةِ الكيميائيَّةِ. (180)

ثابتُ تأيُّنِ الحمضِ acid ionization constant

ثابتُ الاتِّزانِ لتفاعلِ تأيُّنِ الحمضِ، يُرمزُ إليه بالمصطلحِ K_a. (193)

ثابتُ حاصلِ الإذابةِ solubility product constant

هو حاصلُ ضربِ التراكيزِ المولاريَّةِ لأيوناتِ مادَّةٍ معيَّنةٍ في محلولٍ مشبعٍ. (201)

ثابتُ درجةِ التجمُّدِ المولاليِّ molal freezing-point constant

كمِّيَّةٌ تحسَبُ لتمثيلِ انخفاضِ درجةِ تجمُّدِ مذيبٍ في محلولٍ تركيزُهُ 1 مولل ويحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ ولاإلكتروليتيٍّ. (51)

ثابتُ درجةِ الغليانِ المولاليِّ molal boiling-point constant

كميةٌ تحسَبُ لتمثيلِ ارتفاعِ درجةِ غليانِ مذيبٍ في محلولٍ تركيزُهُ 1 مولل ويحتوي على مذابٍ غيرِ متطايرٍ ولاإلكتروليتيٍّ. (54)

ج

الجرافيت graphite

من صوَرِ الكربونِ التآصليَّةِ وهو بلَّورٌ أسودُ ناعمٌ وهشٌّ موصِّلٌ للكهرباءِ. (260)

جُسيمُ ألفا alpha particle

جُسيمٌ له شحنةٌ موجبةٌ تُطلقُ خلالَ تفكُّكِ العناصرِ المشعَّةِ، وهو يتألَّفُ من بروتونَينِ ونيوترونَينِ. (336)

جُسيمُ بيتا beta particle

إلكترونٌ منبعثٌ من النواةِ خلالَ بعضِ أنواعِ الانحلالِ الإشعاعيِّ. (336)

جهدُ الاختزال reduction potential
ميلُ التفاعلِ النصفيِّ إلى الحدوثِ كتفاعلٍ نصفيٍّ للاختزالِ في خليَّةٍ كهروكيميائيَّةٍ. (242)

جهدُ القطبِ electrode potential
هو فرقُ الجهدِ بينَ القطبِ ومحلولِه. (242)

جهدُ القطبِ القياسي
standard electrode potential
هو الجهدُ الذي يظهرُه فلزٌّ أو مادَّةٌ أخرى في محلولِ إلكتروليتٍ بالنسبةِ إلى جهدِ قطبِ الهيدروجينِ المعطى القيمةَ صفرًا. (243)

الجهدُ الكهربائيُّ electric potential
قوةُ سحبِ الإلكتروناتِ عند الكاثود، أو القوى الدافعةُ على الإلكتروناتِ عند الأنود في الخليَّةِ الفولتيَّة. (242)

الجول joule
الوحدةُ المستخدمةُ للتعبيرِ عن الطاقةِ. ويعادلُ كمِّيَّةَ الشغلِ الذي تبذلُهُ قوةٌ من 1 N عبر مسافةٍ من 1 m في اتجاهِ القوَّةِ (ويُرمزُ إليها بالحرفِ J). (127)

ح

الحرارة heat
الطاقةُ المنتقلةُ بين جسمَينِ موجودَينِ عند درجتَيْ حرارةٍ مختلفتَين. تنتقلُ الطاقةُ دائمًا من أجسامٍ ذاتِ درجةِ حرارةٍ عاليةٍ إلى أجسامٍ ذاتِ درجةِ حرارةٍ منخفضةٍ حتى بلوغِ الاتِّزانِ الحراريِّ. (128)

حرارةُ الاحتراقِ heat of combustion
الطاقةُ المنطلقةُ بشكلِ حرارةٍ أثناءَ الاحتراقِ التامِّ لكمِّيَّةٍ محدَّدةٍ من مادَّةٍ عند ضغطٍ ثابتٍ أو حجمٍ ثابتٍ. (134)

حرارةُ التفاعلِ heat of reaction
كمِّيَّةُ الطاقةِ المنطلقةِ أو المتصَّةِ بشكلِ حرارةٍ خلالَ تفاعلٍ كيميائيٍّ. (130)

حرارةُ التكوينِ الموليَّة
molar heat of formation
الكمِّيَّةُ من الطاقةِ المنطلقةِ أو المتصَّةِ بشكلِ حرارةٍ من تكوينِ 1 mol من مادَّةٍ معيَّنةٍ تحت ضغطٍ ثابتٍ. (133)

حرارةُ المحلولِ heat of solution
كمِّيَّةُ الطاقةِ المنطلقةِ أو المتصَّةِ بشكلِ حرارةٍ عندما تذوبُ كمِّيَّةٌ محدَّدةٌ من مذابٍ في مذيبٍ. (24)

الحرارةُ النوعيَّةُ specific heat
كميةُ الحرارةِ اللازمةِ لرفعِ درجةِ حرارةِ وحدةِ الكتلةِ لمادَّةٍ متجانسةٍ 1 K أو 1°C بطريقةٍ محدَّدةٍ تحت ضغطٍ وحجمٍ معيَّنَينِ ثابتَين. (128)

الحفّاز catalyst
مادَّةٌ تغيِّرُ سرعةَ التفاعلِ الكيميائيِّ دون أن تُستهلَكَ خلالَه ودون أن تتغيَّرَ بشكلٍ ملحوظٍ. (162)

الحفّازُ غيرُ المتجانس
heterogeneous catalyst
حفّازٌ يكونُ في حالةٍ فيزيائيَّةٍ مختلفةٍ عن حالةِ المتفاعلاتِ الفيزيائيَّةِ. (162)

الحفّازُ المتجانسُ homogeneous catalyst
حفّازٌ يكونُ في الحالةِ الفيزيائيَّةِ نفسِها للمتفاعلاتِ. (162)

الحمضُ أحاديُّ البروتون
monoprotic acid
حمضٌ يستطيعُ أن يمنحَ بروتونًا واحدًا لقاعدةٍ. (79)

حمضُ أرهينيوس Arrhenius acid
مادَّةٌ تزيدُ من تركيزِ أيونِ الهيدروجينِ في المحلولِ المائيِّ. (73)

الحمضُ الأكسجينيُّ oxyacid
حمضٌ يتكوَّنُ من الهيدروجينِ والأكسجينِ وعنصرٍ ثالثٍ لافلزّيٍّ في الغالبِ. (69)

حمضُ برونشتد-لوري
Brønsted-Lowry acid
مادَّةٌ تمنحُ بروتونًا لمادَّةٍ أخرى. (78)

الحمضُ ثلاثيُّ البروتون triprotic acid
حمضٌ له ثلاثةُ بروتوناتٍ قابلةٍ للتأيُّنِ في كلِّ جزيءٍ، مثلُ حمضِ الفوسفوريكِ. (80)

الحمضُ الثنائيُّ binary acid
حمضٌ لا يحتوي على أكسجينٍ، مثلُ حمضِ الهيدروفلوريكِ. (68)

الحمضُ ثنائيُّ البروتون diprotic acid
حمضٌ له ذرّتا هيدروجينٍ قابلتانِ للتأيُّنِ في كلِّ جزيءٍ، مثلُ حمضِ الكبريتيكِ. (80)

الحمضُ الضعيفُ weak acid
حمضٌ يُنتجُ القليلَ من أيوناتِ الهيدروجينِ في المحلولِ المائيِّ. (74)

الحمضُ القويُّ strong acid
حمضٌ يتأينُ بشكلٍ تامٍّ في المحلولِ المائيِّ. (74)

الحمضُ الكربوكسيليُّ carboxilic acid
حمضٌ عضويٌّ يحتوي على مجموعةِ الكربوكسيلِ الوظيفيَّةِ التي تأتي في طرفِ السلسلةِ الكربونيَّةِ. (306)

حمضُ لويس Lewis acid
ذرَّةٌ أو أيونٌ أو جزيءٌ يستقبلُ زوجًا من الإلكتروناتِ. (81)

الحمضُ متعددُ البروتون
polyprotic acid
حمضٌ يستطيعُ أن يمنحَ أكثرَ من بروتونٍ من كلِّ جزيءٍ. (79)

الحمضُ المرافقُ conjugate acid
حمضٌ يتكوَّنُ عندما تستقبلُ قاعدةٌ بروتونًا. (83)

خ

الخصائصُ التجميعيَّةُ
colligative properties
خصائصُ تعتمدُ على عددِ الجسيماتِ الموجودةِ في نظامٍ ولا تعتمدُ على خصائصِ الجسيماتِ نفسِها. (50)

الخطوةُ المحدِّدةُ للسرعة
rate-determining step
هي، في تفاعلٍ كيميائيٍّ متعدِّدِ الخطواتِ، الخطوةُ التي لها السرعةُ الأبطأُ والتي تحدِّدُ سرعةَ التفاعلِ الكلّيِّ. (168)

الخليَّةُ الإلكتروليتيَّةُ electrolytic cell
جهازٌ كهروكيميائيٌّ يحدثُ فيه تحلُّلٌ كهربائيٌّ، عندما يمرُّ فيه تيّارٌ كهربائيٌّ. (247)

الخليَّةُ الفولتيَّةُ voltaic cell
خليَّةٌ تتألَّفُ من قطبَين مصنوعيَن من فلزَّيْن مختلفَين مغمورَيْن في إلكتروليت؛ تُستخدمُ لتحويل الطاقةِ الكيميائيَّةِ إلى طاقةٍ كهربائيَّةٍ. (238)

د

درجةُ الحرارةِ temperature
مقياسٌ لمقدارِ سخونة (أو برودة) شيءٍ ما. وبشكلٍ محدَّدٍ، هي قياسٌ معدَّل الطاقةِ الحركيَّةِ لجسيماتِ جسمٍ معيَّن. (127)

ذ

الذوبانيَّةُ solubility
قدرةُ مادَّةٍ على الذوبانِ في مادَّةٍ أخرى عند درجةِ حرارةٍ وضغطٍ معيَّنَين. يعبَّرُ عنها بكميَّةِ المذابِ التي تذوبُ في كمِّيَّةٍ معيَّنةٍ من المذيبِ لتُنتجَ محلولاً مشبعًا. (17)

ر

الرتبةُ order
هي، في الكيمياء، تصنيفُ التفاعلاتِ الكيميائيَّةِ الذي يعتمدُ على عددِ الجزيئاتِ التي تدخلُ في التفاعلِ. وهي في قانونِ السرعةِ الأسُّ الذي يرفعُ إليه تركيزُ المتفاعلِ. (164)

رقمُ الأوكتانِ octane rating
مقياسٌ لكفاءةِ احتراقِ الوقودِ وخصائصِ الخبطِ فيه. (277)

الرقمُ الهيدروجينيُّ pH
قيمةٌ تُستخدمُ للتعبيرِ عن حمضيَّةِ نظامٍ أو قلويته (قاعديته). ويدلُّ كلُّ عددٍ صحيحٍ على مقياسِ pH على عشرةِ أضعافِ التغيُّرِ في الحمضيَّةِ. pH تساوي 7 تعني متعادلاً، و pH أقلُّ من 7 حمضيًّا، و pH أكبرُ من 7 قاعديًّا. (99)

الرقمُ الهيدروكسيديُّ pOH
سالبُ اللوغاريتمِ للأساسِ 10 لتركيزِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ $[OH^-]$. (99)

الرِم rem
كميَّةُ الإشعاعِ المؤيِّنِ التي تسبِّبُ ضررًا لأنسجةِ الإنسانِ يساوي الضررَ الذي يسبِّبُه 1 رونتجن من أشعَّة X عاليةِ الفولتيَّةِ. (343)

الرونتجن roentgen
وحدةُ قياسٍ لمقدارِ أشعَّةِ X أو أشعَّةِ جاما التي تساوي كمّيَّةَ الإشعاعِ التي تنتجُ 2×10^9 زوج من الأيوناتِ لدى اختراقِها $1\ cm^3$ من الهواءِ الجافِّ. (343)

س

سرعةُ التفاعلِ reaction rate
السرعةُ التي يحدثُ بموجبِها تفاعلٌ كيميائيٌّ. وهي تقاسُ بسرعةِ تكوُّنِ النواتجِ أو بسرعةِ اختفاءِ المتفاعلاتِ. (160)

سلسلةُ الانحلالِ decay series
سلسلةٌ من نويداتٍ مشعَّةٍ منتجةٍ، خلالَ انحلالٍ إشعاعيٍّ متعاقبٍ حتى بلوغِ نويدةٍ مستقرَّةٍ. (340)

السلسلةُ المتجانسةُ homologous series
سلسلةٌ تختلفُ فيها صيغُ المركَّباتِ المتجاورةِ بوحدةٍ ثابتةٍ. (268)

ش

الشارةُ الفيلميَّةُ film badge
جهازٌ يقيسُ الكمّيَّةَ التقريبيَّةَ للتعرُّضِ الإشعاعيِّ التي يتلقّاها العاملون في حقلِ الإشعاعاتِ، وذلك خلالَ فترةٍ معيَّنةٍ من الزمنِ. (346)

ص

الصيغةُ البنائيَّةُ structural formula
صيغةٌ تدلُّ على مواقعِ الذرّاتِ، أو المجموعاتِ أو الأيوناتِ بعضِها بالنسبةِ إلى بعضٍ في الجزيءِ. وتدلُّ أيضًا على عددِ الروابطِ الكيميائيَّةِ ومواقعِها. (264)

ض

الضغطُ الأسموزيُّ osmotic pressure
الضغطُ الخارجيُّ اللازمُ لإيقافِ عمليَّةِ الأسموزيَّةِ. (56)

ط

طاقةُ التنشيطِ activation energy
أدنى كمِّيَّةٍ من الطاقةِ اللازمةِ لتحويلِ المتفاعلاتِ إلى معقّدٍ منشَّطٍ. (156)

الطاقةُ الحرَّةُ free energy
هي، في نظامٍ معيَّنٍ، الطاقةُ المتوافرةُ للشغلِ. أو قدرةُ نظامٍ على القيامِ بشغلٍ مفيدٍ. (144)

طاقةُ الربطِ النوويّ
nuclear binding energy
الطاقةُ المنطلقةُ عندَما تتكوَّنُ نواةٌ من نويّاتٍ. (340)

الطلاءُ الكهربائيُّ electroplating
هو العمليَّةُ الإلكتروليتيَّةُ لطلاءِ جسمٍ بفلزٍّ أو تغليفِهِ. (248)

ع

العاملُ المؤكسدُ oxidizing agent
مادَّةٌ لها القدرةُ على أكسدةِ مادَّةٍ أخرى. (226)

العاملُ المختزلُ reducing agent
مادَّةٌ لها القدرةُ على اختزالِ مادَّةٍ أخرى. (226)

عدّادُ جايجر-موللر
Geiger-Müller counter
جهازٌ يكشفُ الإشعاعَ من خلالِ حسابِ الإشاراتِ الكهربائيَّةِ المتكوِّنةِ في غازٍ مؤيَّنٍ بفعلِ الإشعاعِ. (344)

العدّادُ الوميضيُّ scintillation counter
جهازٌ يحوِّلُ الضوءَ الوميضيَّ إلى إشارةٍ كهربائيَّةٍ للكشفِ عن الإشعاعِ. (344)

عدمُ التناسبِ disproportionation
عمليَّةٌ يَجري خلالَها عادةً تَحوُّلُ مادَّةٍ إلى مادَّتَيْنِ مختلفتَيْنِ أو أكثرَ بواسطةِ تأكسدٍ واختزالٍ متزامنَيْنِ. (229)

عمرُ النصفِ half-life
الزمنُ اللازمُ لانحلالِ نصفِ كمِّيَّةِ ذرّاتِ نويدةٍ مشعَّةٍ. (338)

عناصرُ ما بعدَ اليورانيوم
transuranium elements
عناصرُ تحتوي على أكثر من 92 بروتونًا في أنويتِها. (342)

غ

الغازُ الطبيعيُّ natural gas
وقودٌ أحفوريٌّ يتكوَّنُ أساسًا من هيدروكربوناتٍ تحتوي في تركيبِها على ذرَّةٍ واحدةٍ إلى أربعِ ذرّاتِ كربونٍ. (277)

الغرويّات colloids
خليطٌ يتألَّفُ من جسيماتٍ دقيقةٍ، تقعُ في مقاييسِها وسطًا بين الجسيماتِ الموجودةِ في المحلولِ والجسيماتِ المعلَّقةِ في سائلٍ أو صلبٍ أو غازٍ. (11)

الغشاءُ شبهُ المنفذِ
semipermeable membrane
غشاءٌ يسمحُ بمرورِ بعضِ الجزيئاتِ فقط. (55)

غيرُ القابلِ للامتزاجِ immiscible
يصفُ سائلَين أو سوائلَ لا يمتزجُ بعضُها ببعضٍ. (20)

ف

الفلكنة vulcanization
عمليَّةُ تداخلٍ بينَ جزيئاتِ بولي الأيزوبرينِ المتجاورةِ التي تحدثُ لدى تسخينِ الجزيئاتِ مع ذرّاتِ كبريتٍ. (319)

الفوران effervescence
تفقُّعُ سائلٍ يسبِّبُه الانفلاتُ السريعُ لغازٍ من هذا السائلِ، وليس غليانُه. (21)

الفوليرين fullerene
صورةٌ تآصليَّةٌ للكربونِ، وهي مادَّةٌ صلبةٌ ذاتُ لونٍ داكنٍ، مكوَّنةٌ من ذرّاتِ كربونٍ مرتَّبةٍ بشكلِ أقفاصٍ كرويَّةٍ. (260)

ق

القابلُ للامتزاجِ miscible
يصفُ سائلَين أو سوائلَ تستطيعُ أن تذوبَ بعضُها في بعضٍ بنسبٍ مختلفةٍ. (20)

قاعدةُ أرهينيوس Arrhenius base
مادةٌ تزيدُ من تركيزِ أيوناتِ الهيدروكسيدِ OH^- في المحلولِ المائيِّ. (73)

قاعدةُ برونشتد-لوري
Brønsted-Lowry base
مادةٌ تستقبلُ بروتونًا. (79)

قاعدةُ لويس Lewis base
ذرَّةٌ أو أيونٌ أو جزيءٌ يمنحُ زوجًا من الإلكتروناتِ. (82)

القاعدةُ المرافقةُ conjugate base
قاعدةٌ تتكوَّنُ عندما يمنحُ حمضٌ بروتونًا. (83)

قانونُ السرعةِ rate law
تعبيرٌ يبيِّنُ كيف تعتمدُ سرعةُ تكوُّنِ النواتجِ على تركيزِ جميعِ الموادِّ التي تشاركُ في التفاعلِ، باستثناءِ المذيبِ. (164)

قانونُ هس Hess's law
إن التغيُّرَ في المحتوى الحراريِّ الكلِّيِّ في التفاعلِ هو حاصلُ جمعِ تغيُّرِ حرارةِ الخطواتِ الفرديَّةِ في عمليَّةِ التفاعلِ. (135)

قانونُ هنري Henry's law
قانونٌ ينصُّ على أن ذوبانيَّةَ غازٍ في سائلٍ، عند درجةِ حرارةٍ ثابتةٍ، تتناسبُ طرديًّا مع الضغطِ الجزئيِّ الذي يمارسُهُ هذا الغازُ على سطحِ السائلِ. (135)

قضبانُ التحكُّمِ control rods
قضبانٌ ماصَّةٌ للنيوتروناتِ تساهمُ في السيطرةِ على التفاعلِ النوويِّ، من خلالِ تقليلِ عددِ النيوتروناتِ الحرَّةِ. (348)

القطب electrode
موصِّلٌ يُستخدمُ لإقامةِ اتِّصالٍ كهربائيٍّ مع جزءٍ غيرِ فلزّيٍّ (أيونيّ) في الدارةِ مثل الإلكتروليتِ. (236)

ك

الكاثود cathode
هو القطبُ الذي تحدثُ عندَه عمليَّةُ الاختزالِ. (236)

الكالوريمتر calorimeter
جهازٌ يُستخدَمُ لقياسِ الطاقةِ الممتصَّةِ أو المنطلقةِ خلال تغيُّرٍ كيميائيٍّ أو فيزيائيٍّ. (127)

الكتلةُ الحرجةُ critical mass
الحدُّ الأدنى لكمّيَّةِ النويداتِ التي توفِّرُ العددَ اللازمَ من النيوتروناتِ لاستمرارِ التفاعلِ المتسلسلِ. (348)

الكحول alcohol
مركَّبٌ عضويٌّ يحتوي على مجموعةٍ أو أكثرَ من مجموعاتِ الهيدروكسيلِ مرتبطةٍ بذرّاتِ الكربونِ. (295)

كواشفُ الحمضِ-القاعدةِ
acid-base indicators
موادُّ تتغيَّرُ ألوانُها بحسبِ pH لمحلولٍ يحتوي عليها. (107)

الكيتون ketone
مركَّبٌ عضويٌّ ترتبطُ فيه مجموعةٌ كربونيليَّةٌ بمجموعتَيْ ألكيلٍ. (304)

الكيمياءُ الحراريَّةُ thermochemistry
فرعٌ من الكيمياءِ يُعنى بدراسةِ انتقالِ الطاقةِ على صورةِ حرارةٍ تصاحبُ التفاعلاتِ الكيميائيَّةَ والتغيُّراتِ الفيزيائيَّةِ. (127)

الكيمياءُ الحركيَّةُ chemical kinetics
فرعٌ في الكيمياءِ يُعنى بدراسةِ سرعةِ التفاعلِ وآليّاتِه. (160)

الكيمياءُ الكهربائيَّةُ electrochemistry
فرعٌ في الكيمياءِ يتعاملُ مع تطبيقاتِ تفاعلاتِ الأكسدةِ والاختزالِ المرتبطةِ بالكهرباءِ. (235)

ل

اللاإلكتروليت nonelectrolyte
مادَّةٌ أو خليطٌ سائلٌ أو صلبٌ غيرُ موصِّلٍ للتيّارِ الكهربائيِّ. (13)

م

المادَّةُ غيرُ المتطايرةِ
nonvolatile substance
هي المادَّةُ التي لها ميلٌ ضعيفٌ لأن تصبحَ غازًا تحتَ الشروطِ القائمةِ. (50)

المادَّةُ القياسيَّةُ الأوَّليَّةُ
primary standard
هي مركَّبٌ صلبٌ منقّى إلى درجةٍ عاليةٍ، ويستخدمُ للتحقُّقِ من تركيزِ المحلولِ القياسيِّ في المعايرةِ. (113)

الماس diamond
صورةٌ صلبةٌ بلّوريَّةٌ عديمةُ اللونِ من صوَرِ الكربونِ. (260)

المتتبِّعُ المشعُّ radioactive tracer
ذرّاتٌ مشعَّةٌ تضافُ إلى مادَّةٍ أخرى، لكي يتسنّى تتبُّعُ حركتِها. (345)

المتذاوب solvated
صفةُ جزيءِ المذابِ المحاطِ بجزيئاتِ المذيبِ. (23)

مجموعةُ الألكيلِ alkyl group
مجموعةٌ من الذرّاتِ تتكوَّنُ عند إزالةِ إحدى ذرّاتِ الهيدروجينِ من جُزيءِ الألكانِ. (270)

المجموعةُ الوظيفيَّةُ functional group
ذرَّةٌ أو مجموعةُ ذرّاتٍ مسؤولةٌ عن الخصائصِ النوعيَّةِ للمركَّبِ العضويِّ. (295)

محطَّةُ توليدِ الطاقةِ النوويَّةِ
nuclear power plant
محطَّةٌ تستخدمُ الطاقةَ الحراريَّةَ من المفاعلاتِ النوويَّةِ لإنتاجِ الطاقةِ الكهربائيَّةِ. (348)

المحلولُ solution
خليطٌ متجانسٌ من مادتَينِ أو أكثرَ منتشرةٍ بانتظامٍ في كلِّ جزءٍ من طورٍ فيزيائيٍّ واحدٍ. (10)

المحلولُ غيرُ المشبعِ unsaturated solution
المحلولُ الذي يحتوي على كمِّيَّةٍ من المذابِ أقلَّ من الكمِّيَّةِ الموجودةِ في محلولٍ مشبعٍ، والقادرُ على إذابةِ كمِّيَّةٍ إضافيَّةٍ من المذابِ. (17)

المحلولُ فوقُ المشبعِ
supersaturated solution
محلولٌ يحتوي على كمِّيَّةٍ ذائبةٍ من المذابِ أكبرَ من الكمِّيَّةِ اللازمةِ لبلوغِ الاتّزانِ عند درجةِ حرارةٍ معيَّنةٍ. (17)

المحلولُ القياسيُّ standard solution
محلولٌ معلومُ التركيزِ يتمُّ التعبيرُ عنه بكمِّيَّةِ المذابِ في كمِّيَّةٍ معيَّنةٍ من المذيبِ أو المحلولِ. (113)

المحلولُ المشبعُ saturated solution
محلولٌ لا يستطيعُ، في ظروفٍ معيَّنةٍ، إذابةَ أيِّ كمِّيَّةٍ إضافيَّةٍ من المذابِ. (17)

المحلولُ المنظِّمُ buffer solution
محلولٌ يقاومُ تغيُّراتِ pH عندَ إضافةِ حمضٍ أو قاعدةٍ إليه بكمِّيّاتٍ قليلةٍ. (194)

المدى الانتقاليُّ transition interval
مدى pH الذي يمكنُ ضمنَهُ ملاحظةُ تغيُّرٍ في الكاشفِ الكيميائيِّ. (108)

المذاب solute
في المحلولِ، هو المادَّةُ التي تذوبُ في المذيبِ. (10)

المذيب solvent
في المحلولِ، هو المادَّةُ التي يذوبُ فيها المذابُ. (10)

المركَّباتُ العضويَّةُ organic compounds
مركَّباتٌ مرتبطةٌ بروابطَ تساهميَّةٍ وتحتوي على الكربونِ، باستثناءِ الكربوناتِ والأكاسيدِ. (248)

المعادلةُ الأيونيَّةُ الصرفةُ
net ionic equation
تتضمَّنُ فقط المركَّباتِ والأيوناتِ التي تتعرَّضُ لتغيُّرٍ كيميائيٍّ عند حدوثِ تفاعلاتٍ في محاليلَ مائيَّةٍ. (43)

المعادلةُ الكيميائيَّةُ الحراريَّةُ
thermochemical equation
تتضمَّنُ كمِّيَّةَ الطاقةِ المنطلقةِ أو الممتصَّةِ كحرارةٍ خلالَ التفاعلِ الكيميائيِّ. (131)

المعايرة titration
طريقةٌ لتحديدِ تركيزِ مادَّةٍ في محلولٍ، وذلك بإضافةِ محلولٍ معلومِ الحجمِ والتركيزِ حتى يصبحَ التفاعلُ تامًّا. ويدلُّ عادةً على تمامِ التفاعلِ تغيُّرٌ في اللونِ. (111)

المعقَّدُ المنشَّطُ activated complex
تركيبٌ في حالةٍ غيرِ مستقرَّةٍ، وهي حالةٌ انتقاليَّةٌ بين المتفاعلاتِ والنواتجِ في تفاعلٍ كيميائيٍّ. (157)

المعلَّق suspension
خليطٌ من سائلٍ أو غازٍ تنتشرُ في كلِّ مكانٍ منه، بشكلٍ أكثرَ أو أقلَّ تساويًا، جسيماتُ مادَّةٍ معيَّنةٍ. (11)

المفاعلُ النوويُّ nuclear reactor
جهازٌ يستخدمُ التفاعلاتِ المتسلسلةَ للانشطاراتِ المسيطَرِ عليها لإنتاجِ الطاقةِ والنويداتِ المشعَّةِ. (348)

مقياس pH pH meter
جهازٌ يستخدَمُ لتحديدِ قيمةِ pH لمحلولٍ من خلالِ قياسِ فرقِ الجهدِ بين إلكترودَين موضوعَين في المحلولِ. (108)

الملح salt
مركَّبٌ أيونيٌّ ينتجُ عندما تحلُّ ذرّةُ فلزٍّ أو أيونٍ موجبٍ محلَّ هيدروجينِ حمضٍ ما. (89)

المهدِّئ moderatore
مادَّةٌ تبطئُ سرعةَ النيوترونات، لتتمكَّنَ الأنويةُ من امتصاصِها. (348)

المولاريَّة molarity
تركيزُ المحلولِ الذي يعبِّرُ عن عددِ مولاتِ المذابِ في لترٍ من المحلولِ. (26)

المولاليَّة molality
تركيزُ المحلولِ الذي يعبِّرُ عن عددِ مولاتِ المذابِ في كيلوجرامٍ من المذيبِ. (30)

المونومر monomer
جزيءٌ بسيطٌ يمكنُه الاتِّحادُ مع جزيئاتٍ مشابهةٍ أو غيرِ مشابهةٍ، لتكوينِ بوليمرٍ. (316)

ن

نصفُ خليَّةٍ half-cell
قطبٌ منفردٌ مغمورٌ في محلولٍ يحتوي على أيوناتِه. (236)

نظريَّةُ التصادمِ collision theory
مجموعةُ الافتراضاتِ الخاصَّةِ بالتصادماتِ والتفاعلاتِ. (154)

النفاياتُ النوويَّةُ nuclear waste
نفاياتٌ تحتوي على نظائرَ مشعَّةٍ. (346)

نقصُ الكتلةِ mass defect
الفرقُ بينَ كتلةِ الذرَّةِ، ومجموعِ كتلِ بروتوناتِ ونيوتروناتِ وإلكتروناتِ هذه الذرَّةِ. (331)

نقطةُ التكافؤِ equivalence point
النقطةُ التي يتواجدُ فيها المحلولانِ المستخدمانِ في عمليَّةِ المعايرةِ بكمِّيّاتٍ متكافئةٍ كيميائيًّا. (112)

نقطةُ النهايةِ end point
النقطةُ التي يتغيَّرُ عندها لونُ الكاشفِ، خلالَ عمليَّةِ معايرةٍ. (112)

نموذجُ الطبقةِ النوويَّةِ nuclear shell model
وفقًا لهذا النموذجِ تقعُ النويّاتُ عند مستوياتِ طاقةٍ أو طبقاتٍ مختلفةٍ داخلَ النواةِ. (333)

النويدة nuclide
ذرَّةٌ مميَّزةٌ بعددِ البروتوناتِ والنيوتروناتِ في نواتِها. (231)

النويدةُ الأمُّ parent nuclide
نويدةٌ مشعَّةٌ هي الأثقلُ في كلِّ سلسلةِ انحلالٍ. (340)

النويدةُ المشعَّةُ radioactive nuclide
نويدةٌ تتكوَّنُ من نواةٍ غيرِ مستقرَّةٍ تخضعُ للانحلالِ الإشعاعيِّ. (335)

النويدةُ الوليدةُ daughter nuclide
نويدةٌ ناتجةٌ من انحلالِ النويدةِ الأمِّ. (340)

النويَّة nucleon
بروتونٌ أو نيوترونٌ. (331)

هـ

هاليدُ الألكيل alkyl halide
مركَّبٌ عضويٌّ تحلُّ فيه ذرَّةُ هالوجينٍ (فلورٍ، كلورٍ، بروم) واحدةٍ أو أكثرَ محلَّ ذرَّةِ هيدروجينٍ أو أكثرَ في جزيءِ الهيدروكربونِ. (298)

الهيدروكربون hydrocarbon
مركَّبٌ عضويٌّ مؤلَّفٌ من الكربونِ والهيدروجينِ فقط. (264)

الهيدروكربونُ الأروماتيُّ
aromatic hydrocarbon
هيدروكربونٌ يحتوي على حلقةٍ أو أكثرَ، مكوَّنةٍ من ستِّ ذرّاتِ كربونٍ وإلكتروناتٍ غيرِ متموضعةٍ. (284)

الهيدروكربونُ غيرُ المشبعِ
unsaturated hydrocarbon
هيدروكربونٌ لا تكوِّنُ فيه كلُّ ذرّاتِ الكربونِ أربعَ روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ. (279)

الهيدروكربونُ المشبعُ
saturated hydrocarbon
هيدروكربونٌ تكوِّنُ فيه كلُّ ذرَّةِ كربونٍ في الجزيءِ أربعَ روابطَ تساهميَّةٍ أحاديَّةٍ مع ذرّاتٍ أخرى. (268)

و

واقي الإشعاع shielding
مادَّةٌ ماصَّةٌ للأشعَّةِ، تُستخدمُ لخفضِ تسرُّبِ الأشعَّةِ من المفاعلاتِ النوويَّةِ. (348)

الوسيط intermediate
مادَّةٌ تتكوَّنُ في خطوةٍ من خطواتِ التفاعلِ الكيميائيِّ، وتعتبرُ بمثابةِ حالةٍ متدرَّجةٍ بين الموادِّ المتفاعلةِ والنواتجِ النهائيَّةِ. (154)

الجدول الدوري

الجدولُ الدوريُّ للعناصر

الفلزّات

- الفلزّات القلويّة
- الفلزّات القلويّةُ الأرضيّة
- الفلزّات الانتقاليّة
- فلزّات أخرى

أشباهُ الفلزّات

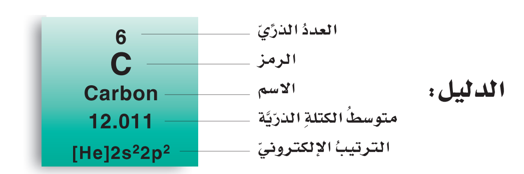
- أشباهُ الموصلات

اللافلزّات

- الهالوجينات
- اللافلزّات الأخرى
- الغازات النبيلة

المجموعة 10	المجموعة 11	المجموعة 12	المجموعة 13	المجموعة 14	المجموعة 15	المجموعة 16	المجموعة 17	المجموعة 18	الدورات
								2 He Helium 4.002602 $1s^2$	1
			5 B Boron 10.811 $[He]2s^22p^1$	6 C Carbon 12.011 $[He]2s^22p^2$	7 N Nitrogen 14.00674 $[He]2s^22p^3$	8 O Oxygen 15.9994 $[He]2s^22p^4$	9 F Fluorine 18.9984032 $[He]2s^22p^5$	10 Ne Neon 20.1797 $[He]2s^22p^6$	2
			13 Al Aluminum 26.981539 $[Ne]3s^23p^1$	14 Si Silicon 28.0855 $[Ne]3s^23p^2$	15 P Phosphorus 30.9738 $[Ne]3s^23p^3$	16 S Sulfur 32.066 $[Ne]3s^23p^4$	17 Cl Chlorine 35.4527 $[Ne]3s^23p^5$	18 Ar Argon 39.948 $[Ne]3s^23p^6$	3
28 Ni Nickel 58.6934 $[Ar]3d^84s^2$	29 Cu Copper 63.546 $[Ar]3d^{10}4s^1$	30 Zn Zinc 65.39 $[Ar]3d^{10}4s^2$	31 Ga Gallium 69.723 $[Ar]3d^{10}4s^24p^1$	32 Ge Germanium 72.61 $[Ar]3d^{10}4s^24p^2$	33 As Arsenic 74.92159 $[Ar]3d^{10}4s^24p^3$	34 Se Selenium 78.96 $[Ar]3d^{10}4s^24p^4$	35 Br Bromine 79.904 $[Ar]3d^{10}4s^24p^5$	36 Kr Krypton 83.80 $[Ar]3d^{10}4s^24p^6$	4
46 Pd Palladium 106.42 $[Kr]4d^{10}5s^0$	47 Ag Silver 107.8682 $[Kr]4d^{10}5s^1$	48 Cd Cadmium 112.411 $[Kr]4d^{10}5s^2$	49 In Indium 114.818 $[Kr]4d^{10}5s^25p^1$	50 Sn Tin 118.710 $[Kr]4d^{10}5s^25p^2$	51 Sb Antimony 121.757 $[Kr]4d^{10}5s^25p^3$	52 Te Tellurium 127.60 $[Kr]4d^{10}5s^25p^4$	53 I Iodine 126.904 $[Kr]4d^{10}5s^25p^5$	54 Xe Xenon 131.29 $[Kr]4d^{10}5s^25p^6$	5
78 Pt Platinum 195.08 $[Xe]4f^{14}5d^96s^1$	79 Au Gold 196.96654 $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^1$	80 Hg Mercury 200.59 $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^2$	81 Ti Thallium 204.3833 $[Xe]4f^{14}5d^{10}6p^1$	82 Pb Lead 207.2 $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^2$	83 Bi Bismuth 208.98037 $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^3$	84 Po Polonium (208.9824) $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^4$	85 At Astatine (209.9871) $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^5$	86 Rn Radon (222.0176) $[Xe]4f^{14}5d^{10}6s^26p^6$	6
110 Uun* Ununnilium (269)** $[Rn]5f^{14}6d^97s^1$	111 Uuu* Unununium (272)** $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^1$	112 Uub* Ununbium (277)** $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^2$	113	114 Uuq* Ununquadium (285)** $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^27p^2$	115	116 Uuh* Ununhexium (289)** $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^27p^4$	117	118 Uuo* Ununoctium (293)** $[Rn]5f^{14}6d^{10}7s^27p^6$	7

63 Eu Europium 151.966 $[Xe]4f^76s^2$	64 Gd Gadolinium 157.25 $[Xe]4f^75d^16s^2$	65 Tb Terbium 158.92534 $[Xe]4f^96s^2$	66 Dy Dysprosium 162.50 $[Xe]4f^{10}6s^2$	67 Ho Holmium 164.930 $[Xe]4f^{11}6s^2$	68 Er Erbium 167.26 $[Xe]4f^{12}6s^2$	69 Tm Thulium 168.93421 $[Xe]4f^{13}6s^2$	70 Yb Ytterbium 173.04 $[Xe]4f^{14}6s^2$	71 Lu Lutetium 174.967 $[Xe]4f^{14}5d^16s^2$
95 Am Americium (243.0614) $[Rn]5f^77s^2$	96 Cm Curium (247.0703) $[Rn]5f^76d^17s^2$	97 Bk Berkelium (247.0703) $[Rn]5f^97s^2$	98 Cf Californium (251.0796) $[Rn]5f^{10}7s^2$	99 Es Einsteinium (252.083) $[Rn]5f^{11}7s^2$	100 Fm Fermium (257.0951) $[Rn]5f^{12}7s^2$	101 Md Mendelevium (258.10) $[Rn]5f^{13}7s^2$	102 No Nobelium (259.1009) $[Rn]5f^{14}7s^2$	103 Lr Lawrencium 262.11 $[Rn]5f^{14}6d^17s^2$



الدورات	المجموعة 1	المجموعة 2	المجموعة 3	المجموعة 4	المجموعة 5	المجموعة 6	المجموعة 7	المجموعة 8	المجموعة 9
1	1 H Hydrogen 1.00794 $1s^1$								
2	3 Li Lithium 6.941 $[He]2s^1$	4 Be Beryllium 9.012182 $[He]2s^2$							
3	11 Na Sodium 22.989768 $[Ne]3s^1$	12 Mg Magnesium 24.3050 $[Ne]3s^2$							
4	19 K Potassium 39.0983 $[Ar]4s^1$	20 Ca Calcium 40.078 $[Ar]4s^2$	21 Sc Scandium 44.955910 $[Ar]3d^14s^2$	22 Ti Titanium 47.88 $[Ar]3d^24s^2$	23 V Vanadium 50.9415 $[Ar]3d^34s^2$	24 Cr Chromium 51.9961 $[Ar]3d^54s^1$	25 Mn Manganese 54.93805 $[Ar]3d^54s^2$	26 Fe Iron 55.847 $[Ar]3d^64s^2$	27 Co Cobalt 58.93320 $[Ar]3d^74s^2$
5	37 Rb Rubidium 85.4678 $[Kr]5s^1$	38 Sr Strontium 87.62 $[Kr]5s^2$	39 Y Yttrium 88.90585 $[Kr]4d^15s^2$	40 Zr Zirconium 91.224 [Kr]4d25s2	41 Nb Niobium 92.90638 $[Kr]4d^45s^1$	42 Mo Molybdenum 95.94 $[Kr]4d^55s^1$	43 Tc Technetium (97.9072) $[Kr]4d^65s^1$	44 Ru Ruthenium 101.07 $[Kr]4d^75s^1$	45 Rh Rhodium 102.906 $[Kr]4d^85s^1$
6	55 Cs Cesium 132.90543 $[Xe]6s^1$	56 Ba Barum 137.327 $[Xe]6s^2$	57 La Lanthanum 138.9055 $[Xe]5d^16s^2$	72 Hf Hafnium 178.49 $[Xe]4f^{14}5d^26s^2$	73 Ta Tantalum 180.9479 $[Xe]4f^{14}5d^36s^2$	74 W Tungsten 183.84 $[Xe]4f^{14}5d^46s^2$	75 Re Rhenium 186.207 $[Xe]4f^{14}5d^56s^2$	76 Os Osmium 190.23 $[Xe]4f^{14}5d^66s^2$	77 Ir Iridium 192.22 $[Xe]4f^{14}5d^76s^2$
7	87 Fr Francium (223.0197) $[Rn]7s^1$	88 Ra Radium (226.0254) $[Rn]7s^2$	89 Ac Actinium (227.0278) $[Rn]6d^17s^2$	104 Rf Rutherfordium (261.11) $[Rn]5f^{14}6d^27s^2$	105 Db Dubnium (262.114) $[Rn]5f^{14}6d^37s^2$	106 Sg Seaborgium (263.118) $[Rn]5f^{14}6d^47s^2$	107 Bh Bohrium (262.12) $[Rn]5f^{14}6d^57s^2$	108 Hs Hassium (265)** $[Rn]5f^{14}6d^67s^2$	109 Mt Meitnerium (265)** $[Rn]5f^{14}6d^77s^2$

58 Ce Cerium 140.115 $[Xe]4f^15d^16s^2$	59 Pr Praseodymium 140.908 $[Xe]4f^36s^2$	60 Nd Neodymium 144.24 $[Xe]4f^46s^2$	61 Pm Promethium (144.9127) $[Xe]4f^56s^2$	62 Sm Samarium 150.36 $[Xe]4f^66s^2$
90 Th Thorium 232.0381 $[Rn]6d^27s^2$	91 Pa Protactinium 231.03588 $[Rn]5f^26d^17s^2$	92 U Uranium 238.0289 $[Rn]5f^36d^17s^2$	93 Np Neptunium (237.0482) $[Rn]5f^46d^17s^2$	94 Pu Plutonium 244.0642 $[Rn]5f^67s^2$

* أسماءٌ مؤقتةٌ لم يتمَّ التوافُقُ عليها من قِبلِ IUPAC.

** مقدّرةٌ وفقًا لمعطياتِ IUPAC المتوفِّرةِ حاليًّا.